



Universidad de Oviedo  
*Universidá d'Uviéu*  
*University of Oviedo*



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**ÁREA DE INGENIERÍA DE LOS PROCESOS DE  
FABRICACIÓN**

## **ESTUDIO DEL EFECTO DE UN TRATAMIENTO QUÍMICO EN ESFERAS DE PRECISIÓN PARA SU USO COMO ELEMENTOS DE REFERENCIA EN METROLOGÍA SIN CONTACTO**

**D. PELAYO FELGUEROSO COTO**

**TUTORES:**

**D. VÍCTOR MANUEL MEANA DÍAZ**

**D. EDUARDO CUESTA GONZÁLEZ**

**FECHA: NOVIEMBRE 2022**

## ÍNDICE

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. MEMORIA .....</b>                        | <b>7</b>  |
| 1.1. INTRODUCCIÓN.....                         | 8         |
| 1.1.1. Motivación y antecedentes .....         | 8         |
| 1.2. RESUMEN.....                              | 11        |
| 1.3. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN.....            | 12        |
| 1.4. METODOLOGÍA DESARROLLADA.....             | 13        |
| 1.4.1. Equipos de inspección .....             | 16        |
| 1.4.1.1. Estado del arte .....                 | 16        |
| 1.4.1.2. Equipos por contacto .....            | 24        |
| 1.4.1.3. Equipos sin contacto.....             | 26        |
| 1.4.2. Fabricación de muestras de ensayo ..... | 27        |
| 1.4.3. Medición pre-tratamiento químico .....  | 28        |
| 1.4.3.1. Medición por contacto.....            | 28        |
| 1.4.3.2. Medición sin contacto .....           | 30        |
| 1.4.4. Proceso de tratamiento químico .....    | 46        |
| 1.4.5. Medición post-tratamiento químico ..... | 51        |
| 1.4.5.1. Medición por contacto.....            | 51        |
| 1.4.5.2. Medición sin contacto .....           | 53        |
| 1.4.6. Análisis y comparativa resultados ..... | 56        |
| 1.5. CONCLUSIONES.....                         | 64        |
| 1.6. TRABAJOS FUTUROS.....                     | 67        |
| 1.7. BIBLIOGRAFÍA.....                         | 68        |
| <b>2. PRESUPUESTO .....</b>                    | <b>71</b> |
| 2.1. COSTES DE EJECUCIÓN MATERIAL .....        | 72        |
| 2.1.1. Coste de material .....                 | 72        |
| 2.1.2. Coste de mano de obra .....             | 72        |
| 2.1.3. Coste de ingeniería .....               | 73        |
| 2.1.4. Amortización de equipos.....            | 73        |
| 2.1.5. Coste total de ejecución material.....  | 73        |
| 2.2. GASTOS GENERALES .....                    | 74        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.3.      | IMPORTE TOTAL .....   | 75        |
| <b>3.</b> | <b>PLANOS.....</b>  | <b>76</b> |
| <b>4.</b> | <b>ANEXOS .....</b>   | <b>86</b> |
| 4.1.      | ANEXO I: TABLAS DE RESULTADOS DE MEDICIÓN.....                  | 87        |
| 4.1.1.    | Tablas de mediciones por contacto antes del tratamiento .....   | 87        |
| 4.1.2.    | Tablas de mediciones sin contacto antes del tratamiento .....   | 90        |
| 4.1.3.    | Tablas de mediciones por contacto después del tratamiento ..... | 93        |
| 4.1.4.    | Tablas de mediciones sin contacto después del tratamiento.....  | 96        |
| 4.1.4.1.  | Ganancia alta .....   | 96        |
| 4.1.4.2.  | Ganancia normal.....  | 99        |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Diseño básico (CAD) de muestra patrón. ....   | 13 |
| Figura 2. Metodología .....   | 15 |
| Figura 3. Metrología en sus primeras manifestaciones .....  | 17 |
| Figura 4. Máquina de medir de coordenadas .....   | 18 |
| Figura 5. Sistema de coordenadas de la CMM.....   | 19 |
| Figura 6. Sonda electrónica.....  | 20 |
| Figura 7. Diferentes tamaños y tipos de sondas.....   | 20 |
| Figura 8. Sonda montada sobre un vástago con resorte .....  | 21 |
| Figura 9. Movimiento independiente de la sonda respecto al pórtico.....   | 21 |
| Figura 10. Parámetros geométricos y constructivos de un LTS.....  | 23 |
| Figura 11. Máquina CMM .....  | 25 |
| Figura 12. Sonda de palpado .....   | 26 |
| Figura 13. Sensor láser de triangulación HP-L-10.6®.....  | 27 |
| Figura 14. Sujeción con utillaje modular para medición por contacto pre-ácido.....  | 28 |
| Figura 15. Cualificación del palpador .....   | 29 |
| Figura 16. Sujeción de apoyo simple para medición sin contacto .....  | 31 |
| Figura 17. Lista de posiciones que se van a cualificar .....  | 33 |
| Figura 18. Cualificación del sensor láser .....   | 34 |
| Figura 19. Configuración parámetros del sensor láser HP-L-10.6® pre-ácido.....  | 35 |
| Figura 20. Valores de recopilación de datos del sensor láser HP-L-10.6® .....   | 36 |
| Figura 21. Disposición del sensor láser.....  | 37 |
| Figura 22. Nube de Puntos generada con el sensor láser en PCDMIS 2018 R2®.....  | 37 |
| Figura 23. Selección de puntos pertenecientes solamente a las esferas .....   | 38 |
| Figura 24. Nube de puntos perteneciente al sensor láser antes y después de eliminar los puntos no pertenecientes a las entidades evaluadas en el programa 3DReshaper®. .... | 39 |
| Figura 25. Evolución del diámetro según el factor multiplicador del filtro Sigma o desviación estándar.....   | 41 |
| Figura 26. Evolución del error de forma según el factor multiplicador del filtro Sigma o desviación estándar. ....  | 41 |
| Figura 27. Antes y después de la aplicación del filtro 2 Sigma en una esfera .....  | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 28. Puntos espurios pertenecientes a una esfera .....  | 44 |
| Figura 29. Disposición de los materiales necesarios para realizar el tratamiento.....   | 47 |
| Figura 30. Componentes del agua regia .....   | 47 |
| Figura 31. Proceso de mezcla.....   | 48 |
| Figura 32. Conjuntos con los espaciadores incorporados .....  | 49 |
| Figura 33. Esferas siendo sumergidas en la solución de agua regia .....   | 49 |
| Figura 34. Recipiente con agua desionizada .....  | 50 |
| Figura 35. Detalle de una esfera tras el tratamiento químico.....   | 51 |
| Figura 36. Sujeción con utillaje modular para medición por contacto post-ácido.....   | 51 |
| Figura 37. Medición sin contacto de las esferas post-ácido.....   | 53 |
| Figura 38. Configuración para el escaneo con ganancia normal.....   | 54 |
| Figura 39. Desviación Estándar pre y post-ácido en Ganancia Alta.....   | 60 |
| Figura 40. Defectos en la reconstrucción de las esferas.....  | 62 |
| Figura 41. Relación de mejora en la medida sin contacto para los tres parámetro estudiados considerados tras el proceso de baño químico ..... | 63 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Planificación.....   | 12 |
| Tabla 2. Computo de las medidas de las esferas por contacto (Pre-ácido) .....   | 30 |
| Tabla 3. Orientaciones usadas para el escaneo con el equipo HP-L-10.6®.....   | 32 |
| Tabla 4. Valores del diámetro, número de puntos y error de forma obtenidos según el Filtro Sigma aplicado .....                   | 40 |
| Tabla 5. Cálculo del Filtro Sigma para las esferas de 10mm .....  | 44 |
| Tabla 6. Cálculo del Filtro Sigma para las esferas de 18mm .....  | 45 |
| Tabla 7. Cálculo del Filtro Sigma para las esferas de 25mm .....  | 45 |
| Tabla 8. Computo de las medidas de las esferas con HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Pre-ácido) .....                                  | 46 |
| Tabla 9. Computo de las medidas de las esferas por contacto (Post-ácido).....   | 52 |
| Tabla 10. Computo de las medidas de las esferas con HP-L-10.6® en Ganancia Normal (Post-ácido).....                               | 55 |
| Tabla 11. Computo de las medidas de las esferas con HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Post-ácido).....                                 | 56 |
| Tabla 12. Comparación de la medición por contacto y sin contacto del diámetro antes y después del tratamiento químico.....        | 57 |
| Tabla 13. Comparación de la medición por contacto y sin contacto del Error de Forma antes y después del tratamiento químico ..... | 57 |
| Tabla 14. Diferencia de la medición del Diámetro por contacto de las esferas antes y después del tratamiento.....                 | 58 |
| Tabla 15. Diferencia de la medición del Error de Forma por contacto antes y después del tratamiento.....                          | 58 |
| Tabla 16. Desviación Estándar de la nube de puntos .....  | 59 |
| Tabla 17. Mejora de la desviación estándar de la nube de puntos después del tratamiento químico.....                              | 59 |
| Tabla 18. Número de puntos obtenidos antes y después del tratamiento.....   | 61 |
| Tabla 19. Mejora en el Número de puntos captados post-ácido en ganancia alta.....   | 62 |
| Tabla 20. Coste de material.....  | 72 |
| Tabla 21. Coste de mano de obra .....   | 72 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 22. Coste de ingeniería.....  | 73  |
| Tabla 23. Amortización de equipos.....  | 73  |
| Tabla 24. Coste total de ejecución material. ....                                       | 73  |
| Tabla 25. Gastos generales.....   | 74  |
| Tabla 26. Importe total del presupuesto .....   | 75  |
| Tabla 27. Medidas de las esferas de 10mm por contacto (Pre-ácido).....                  | 87  |
| Tabla 28. Medidas de las esferas de 18mm por contacto (Pre-ácido).....                  | 88  |
| Tabla 29. Medidas de las esferas de 25mm por contacto (Pre-ácido).....                  | 89  |
| Tabla 30. Medidas de las esferas de 10mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Pre-ácido).....   | 90  |
| Tabla 31. Medidas de las esferas de 18mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Pre-ácido).....   | 91  |
| Tabla 32. Medidas de las esferas de 25mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Pre-ácido).....   | 92  |
| Tabla 33. Medidas de las esferas de 10mm por contacto (Post-ácido) .....                | 93  |
| Tabla 34. Medidas de las esferas de 18mm por contacto (Post-ácido) .....                | 94  |
| Tabla 35. Medidas de las esferas de 25mm por contacto (Post-ácido) .....                | 95  |
| Tabla 36. Medidas de las esferas de 10mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Post-ácido) ..... | 96  |
| Tabla 37. Medidas de las esferas de 18mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Post-ácido) ..... | 97  |
| Tabla 38. Medidas de las esferas de 25mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Post-ácido) ..... | 98  |
| Tabla 39. Medidas de las esferas de 10mm HP-L-10.6® en Ganancia Normal (Post-ácido)..   | 99  |
| Tabla 40. Medidas de las esferas de 18mm HP-L-10.6® en Ganancia Normal (Post-ácido)     | 100 |
| Tabla 41. Medidas de las esferas de 25mm HP-L-10.6® en Ganancia Normal (Post-ácido)     | 101 |

# 1. MEMORIA



## 1.1. INTRODUCCIÓN

### 1.1.1. Motivación y antecedentes

En los últimos años, la metrología sin contacto se ha convertido en una herramienta indispensable para garantizar un alto grado de competitividad, control de calidad y madurez tecnológica de los principales procesos industriales, particularmente en la industria aeroespacial y en la automoción. Estos equipos de medición sin contacto ofrecen la posibilidad de capturar una gran cantidad de información en menos tiempo y, además, aportando aplicaciones técnicas que están fuera del rango de utilización de métodos convencionales de medición por contacto. Sabiendo esto es fácil entender el papel tan determinante que tienen estos equipos en el clima actual, donde la precisión y la eficiencia tienen tan alta demanda [1].

Cuando se trabaja con dispositivos de medición dentro del ámbito de la metrología por coordenadas, es necesario disponer de patrones para la medida, referencia y cualificación de los sistemas de medición. Estos patrones proveen datos confiables para la alineación de los dispositivos y de las herramientas, asegurando una buena repetibilidad en los ejes utilizados. El patrón más utilizado es la esfera de precisión, estas esferas son geométricamente perfectas y referencian a los ejes de una máquina de medición con muy alta precisión, su superficie no permite variaciones y permanecen siempre en la misma medida y posición. Esta es la forma más rápida y eficaz para alinear el dispositivo de medición sin perder precisión en la alineación.

Actualmente los costes de fabricación y materialización de esferas de precisión (grados G3, G5 o G10; esfericidad  $< 0,25 \mu\text{m}$ ; rugosidad media  $< 0,020 \mu\text{m}$ , según ISO 3290/DIN 5401 [2]) son muy elevados. Principalmente porque son construidas específicamente para ese fin, partiendo de polvo cerámico, sinterizadas y pulidas posteriormente. También se exige que este tipo de esferas estén dotadas de alta dureza y resistencia al desgaste, utilizando materiales como rubí, alúmina, zafiro o zirconio, entre otros.

Desde esta perspectiva, la capacidad de aportar soluciones que minimicen el impacto económico que les supone a las industrias la implementación de los procesos de verificación sin contacto en cualquiera de sus etapas se convierte en una necesidad. Una de estas fases, fundamental a la hora de medir y controlar piezas, es el proceso de ajuste y calibración de los

sensores ópticos y, por tanto, la disponibilidad de elementos de referencia utilizables para este propósito.

Aquí se encuentra el punto de partida de la investigación, ya que cuando se pretende utilizar las esferas de precisión como elementos de referencia de sensores ópticos no es necesario que las esferas tengan estos altos grados de dureza ni de resistencia al desgaste. Para la aplicación como elementos de referencia es suficiente con que sean materiales inoxidables (pudiéndose utilizar aleaciones de aluminio o aceros de calidades como AISI 304, AISI 316 [3] o similares), siempre y cuando sea posible obtener medidas de alta precisión a partir de estas esferas.

La capacidad de obtener medidas precisas, mediante el escaneado láser, estará ligada a una serie de factores que influirán directamente en los resultados: la calidad del sensor, la orientación del rayo láser, la ruta de escaneo y las propiedades físicas y geométricas de la pieza [4]. También es conocido que las mediciones mediante escáner 3D se ven afectadas por las propiedades ópticas de la superficie del objeto que se mide. Diversos estudios [5] [6] han investigado y analizado estos y otros factores y los problemas asociados al uso del escáner láser en los procesos de medición, siendo una de sus mayores debilidades la imposibilidad de aplicar el proceso de ingeniería inversa a piezas con superficies brillantes dado que son generadoras de valores atípicos en las nubes de puntos capturadas [7]. Es decir, la reflectividad de la superficie es fuente de una considerable aleatoriedad en los resultados obtenidos.

Sin embargo, se ha demostrado que es posible conseguir esferas de precisión de bajo coste como elementos de referencia para equipos de medida sin contacto mediante la modificación superficial de esferas de rodamientos fabricadas en acero inoxidable a través de procesos mecánicos, como el arenado superficial [8]. Este proceso modificador del estado superficial genera mínimos cambios tanto en el diámetro como en la desviación de forma de las esferas pudiéndose validar el uso de las esferas como elementos de referencia para la calibración de equipos ópticos.

Este trabajo forma parte de una línea investigadora abierta, en el Área de la Ingeniería de los Procesos de Fabricación, sobre la búsqueda de elementos de referencia de bajo coste, a partir de esferas de acero inoxidable, para su uso en la calibración de equipos ópticos y en aplicaciones de metrología sin contacto e ingeniería inversa, con el fin de facilitar el acercamiento de la

medición sin contacto a los procesos industriales y, además, minimizando el impacto económico que esto supone.

## 1.2. RESUMEN

El presente trabajo busca analizar la alteración superficial que se produce en esferas de precisión de bajo coste, fabricadas en acero inoxidable, tras un tratamiento químico de inmersión en ácido, también de bajo coste, con el propósito de que este proceso pueda obtener esferas que puedan ser utilizadas para el ajuste y/o la calibración de sensores ópticos y equipos de metrología e ingeniería inversa sin contacto. La experimentación que tendrá lugar en este trabajo abarca desde el diseño y fabricación de los conjuntos de esferas hasta la evaluación exhaustiva de dichas esferas antes y después de su modificación superficial.

Al tratar químicamente las esferas se obtiene una superficie menos brillante y, por tanto, más adecuada para el escaneo láser y la obtención de la nube de puntos. Con el objetivo de validar la experimentación, se ha llevado a cabo una evaluación por contacto utilizando un palpador que se acopla en una máquina de medir por coordenadas (CMM). Seguido de una inspección utilizando un sensor de triangulación láser montado también sobre la CMM. Ambas mediciones se realizan antes y después del tratamiento químico. Los datos recogidos permitirán contrastar y analizar el efecto del proceso químico sobre la superficie de las esferas y, además, identificar la validez y el grado de idoneidad del tratamiento.

Los parámetros que se utilizan para el estudio del efecto de los tratamientos en las esferas, tanto en palpado por contacto como en el escaneado láser son: el número de puntos obtenidos, los diámetros de las esferas, los errores de forma y la desviación estándar de la nube sobre la esfera de mejor ajuste. Se pretende comprobar la mejora de la calidad de las nubes de puntos obtenidas por el sensor láser cuando se eliminan brillos que distorsionan y reducen la cantidad y calidad de las nubes de puntos.

### 1.3. OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN

El objetivo principal por alcanzar es que el proyecto identifique la validez y el grado de idoneidad de un tratamiento químico de bajo coste sobre esferas de acero inoxidable, también de bajo coste, para su uso como elementos de referencia en aplicaciones de metrología sin contacto e ingeniería inversa. No obstante, para el alcance de este objetivo principal, el trabajo de investigación nos permitirá alcanzar una serie de objetivos parciales de interés tecnológico, tales como:

- El establecimiento de una metodología a seguir en las mediciones, tanto por contacto como sin contacto, incluyendo un análisis estadístico de los datos obtenidos.
- La influencia de la aplicación de filtros de los sensores ópticos sobre la calidad de las nubes de puntos que se obtienen.
- La definición de los parámetros del tratamiento químico, orientación, concentración de la disolución, tiempo de exposición, etc.
- Los efectos del baño químico sobre los parámetros de referencia (errores de forma, diámetros, número de puntos obtenidos y desviación estándar de la nube de puntos sobre la esfera de mejor ajuste).
- La posible influencia del proceso sobre esferas de distintos diámetros, como elementos de referencia.

La elaboración de este trabajo se ha dividido en 8 etapas diferentes que se han realizado a lo largo de 8 meses. La planificación que se ha seguido se puede observar en la Tabla 1.

*Tabla 1. Planificación*

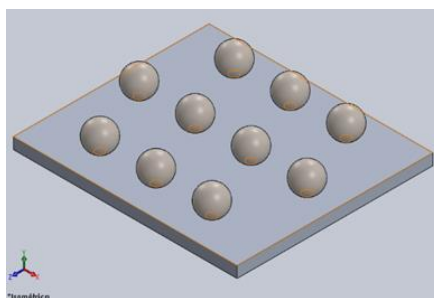
| ETAPAS   | MES |   |   |   |   |   |   |   |
|--|-----|---|---|---|---|---|---|---|
|  | 1   | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1. Estudios previos  |     |   |   |   |   |   |   |   |
| 2. Definición de criterios de medición y metodología de evaluación |     |   |   |   |   |   |   |   |
| 3. Fabricación de los conjuntos                                    |     |   |   |   |   |   |   |   |
| 4. Medición por contacto y sin contacto de las esferas originales  |     |   |   |   |   |   |   |   |
| 5. Tratamiento superficial de las muestras                         |     |   |   |   |   |   |   |   |
| 6. Medición por contacto y sin contacto de los conjuntos tratados  |     |   |   |   |   |   |   |   |
| 7. Análisis de resultados  |     |   |   |   |   |   |   |   |
| 8. Elaboración de las conclusiones                                 |     |   |   |   |   |   |   |   |

## 1.4. METODOLOGÍA DESARROLLADA.

Partiendo de la planificación establecida en la Tabla 1, se desarrollan, a continuación, las actividades que se seguirán para la consecución de los objetivos planteados:

**1.- Estudios previos: Tecnologías de digitalizado e ingeniería inversa. Normativa y procedimientos de calibración.** Ha sido una tarea básica y necesaria de aproximación al proyecto. En este paso se actualiza el conocimiento relativo a los procesos de inspección sin contacto y a los distintos softwares empleados. Se lleva a cabo una familiarización con la normativa de calibración actual (relativa a medición por coordenadas), así como con los procedimientos de cálculo y expresión de incertidumbre de medida en calibración.

**2.- Definición de criterios de medición y metodología de evaluación.** Se han diseñado distintos modelos de placas (Figura 1) dotadas de un número suficiente de esferas del mismo diámetro (10 unidades por placa) para evaluar estadísticamente la influencia del proceso. En base a los diseños de las muestras patrón se definirán los criterios a seguir en las mediciones tanto por contacto como sin contacto, estableciendo y registrando todos los parámetros empleados, los elementos utilizados para los ensayos y el procedimiento seguido.



*Figura 1. Diseño básico (CAD) de muestra patrón.*

**3.- Fabricación de los conjuntos.** Para llevar a cabo la experimentación, se fabrican 3 conjuntos, cada uno de los cuales consta de una pletina sobre la que se montan 10 esferas del mismo tamaño (tres tamaños diferentes). De esta forma, para la experimentación se dispone de una placa con esferas de 10 mm de diámetro, una placa con esferas de 18 mm y otra placa con esferas de 25 mm. La disposición de las esferas y el montaje, idéntico en cada placa, facilita su manejo y permite la identificación unívoca de cada esfera en su posición.

**4.- Medición por contacto y sin contacto de las esferas originales.** Las 30 esferas se midieron con la máquina de medir por coordenadas (CMM) obteniendo valores de referencia, tanto dimensionales como geométricos, de alta precisión. Adicionalmente, las 30 esferas se digitalizaron mediante el uso de técnicas de medición sin contacto basadas en el uso de un láser de triangulación, controlando la potencia en tiempo real y de forma automática.

**5.- Tratamiento superficial de las muestras.** Todas las esferas (10 unidades de Ø10 mm, 10 de Ø18 mm y 10 de Ø25 mm) se someten a un tratamiento químico por medio de un baño en ácido clorhídrico (HCl) al 37% y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) al 65,7% durante 8 minutos. Se modifica el estado y acabado superficial de las esferas obteniendo conjuntos con menos brillo y diferente textura.

**6.- Medición por contacto y sin contacto de los todos los conjuntos tratados.** Medición de todos los conjuntos tratados químicamente. Se han repetido los procesos de medición de las esferas una vez tratadas, haciendo uso de la máquina de medir por coordenadas (por contacto) y mediante el sensor láser de triangulación (sin contacto).

**7.- Análisis de resultados.** Se ha llevado a cabo una comparación de los resultados obtenidos. Para ello, se han comparado los valores de las medidas y tolerancias obtenidas a partir de las mediciones por contacto, así como de las nubes de puntos obtenidas a través de las mediciones sin contacto.

**8.- Elaboración de las conclusiones.** Finalmente se realizaron las conclusiones, donde se procesó la información obtenida durante la investigación y se efectuó una valoración de la experimentación realizada.

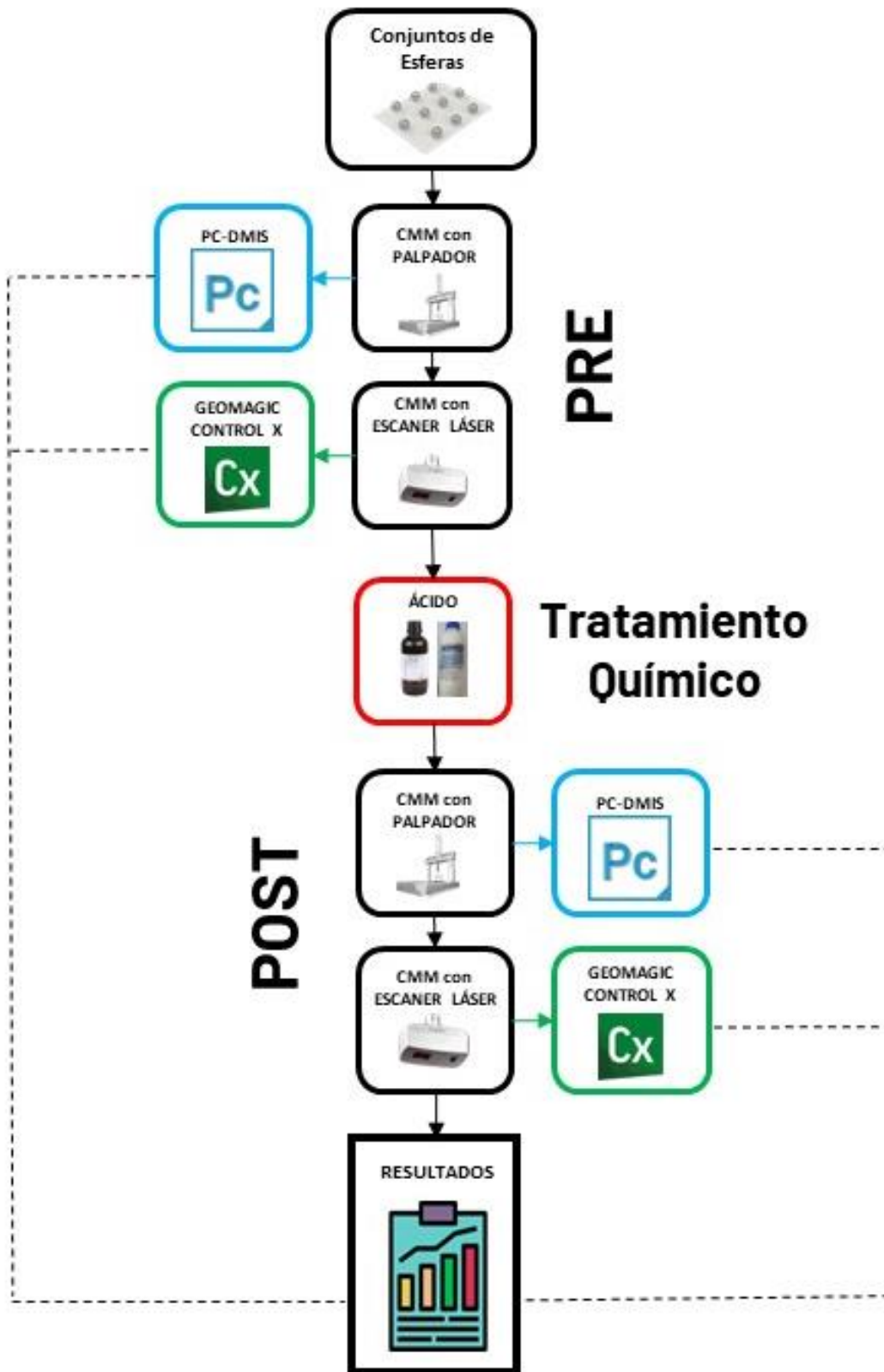


Figura 2. Metodología



### 1.4.1. Equipos de inspección

#### 1.4.1.1. Estado del arte

En un mundo cada vez más globalizado e interconectado, el funcionamiento y comportamiento de la sociedad actual está basado en la confianza mutua y ello depende, en gran parte, de que las medidas sean fiables. Asimismo, las medidas y su exactitud están presentes en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, en la investigación, en la fabricación y el control de los procesos industriales, así como en la protección del medio ambiente y la gestión de la energía y los recursos naturales [9].

La medición o medida es el proceso que tiene por finalidad determinar un valor de una magnitud que se puede medir. La metrología es la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. Su objetivo fundamental es la obtención y expresión del valor de las magnitudes (es decir, el resultado de la medición y la incertidumbre de la medida) empleando para ello instrumentos, métodos y medios apropiados, con la exactitud requerida en cada caso. Es esencial para todos aquellos ocupados en las diferentes cadenas de medidas, calibraciones y acreditaciones.

Frente a esta «metrología científica» o fundamental, se entiende por «metrología legal» el campo de la metrología que contempla las actividades por las que se establecen las exigencias legales sobre las medidas, unidades de medida, instrumentos de medida y métodos de medida, cuyos resultados puedan tener influencia sobre la transparencia de transacciones comerciales, la salud o la seguridad de consumidores y usuarios, así como sobre el medio ambiente. Estas actividades se realizan bajo la responsabilidad y la supervisión de las autoridades competentes con el fin de garantizar con un nivel apropiado de credibilidad sus resultados en el marco de una reglamentación, ya sea armonizada a nivel europeo, o nacional.

La metrología ha formado parte de la vida diaria de los pueblos. Desde sus primeras manifestaciones, normalmente incluida dentro de la antropología general, pasando por la arquitectura y la agrimensura, hasta las transacciones comerciales, la propiedad de la tierra y el derecho a percibir rentas [10].

Antes del Sistema Métrico Decimal, los humanos no tenían más remedio que echar mano de lo que llevaban encima, su propio cuerpo (Figura 3), para contabilizar e intercambiar productos. Así aparece el pie, casi siempre apoyado sobre la tierra, como unidad de medida útil para medir pequeñas parcelas. Aparece el codo, útil para medir piezas de tela u otros objetos que se pueden

colocar a la altura del brazo, en un mostrador o similar. Aparece el paso, útil para medir terrenos más grandes, caminando por las lindes. Para medidas más pequeñas, de objetos delicados, aparece la palma y, para menores longitudes, el dedo.



*Figura 3. Metrología en sus primeras manifestaciones*

La metrología y el actual Sistema Internacional de Unidades (SI) facilitan la comparabilidad de las mediciones y por tanto la intercambiabilidad de los productos a escala internacional. El SI sirve hoy como lenguaje común de las comunicaciones, de la tecnología, de las investigaciones, de la ciencia y del comercio internacional.

La metrología tiene aplicación en diversos ámbitos como el científico, industrial, comercial, económico y legal. La sociedad, industria, comercio o ciencia, en su día a día, hacen uso de una gran variedad de instrumentos de medida para llevar a cabo sus mediciones. Desde un sencillo cronómetro a potentes microscopios.

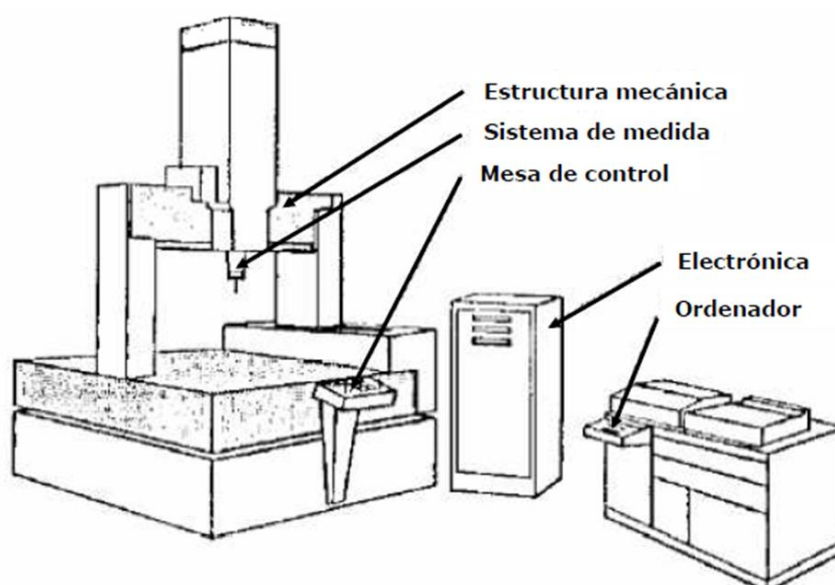
Además, la metrología es un pilar fundamental de la infraestructura de la calidad, junto con la normalización y la acreditación, que son dependientes de las actividades metrológicas que aseguran la trazabilidad y exactitud de las mediciones que se efectúan en los ensayos, cuyos resultados son la evidencia para las certificaciones en base a la regulación establecida.

En la actualidad, la metrología está evolucionando a un ritmo mucho más dinámico que en pasadas décadas para adaptarse a las nuevas demandas y con ello potenciar futuros desarrollos en el campo de la ciencia y la tecnología. Los avances en metrología son la base de la innovación, mejoran la calidad de vida y potencian otras áreas de la ciencia.

Entre los factores clave que están provocando esta evolución de la metrología tradicional hacia nuevos horizontes para cubrir demandas que están apareciendo en la sociedad, podemos señalar los siguientes [11]:

- La sociedad actual requiere mediciones que aporten confianza y den los mismos resultados independientemente del lugar de realización. Clave para la intercambiabilidad de piezas y componentes.
- La globalización del comercio y de la industria, con la creciente circulación de productos y servicios entre países, genera un aumento del interés por la exactitud y reproducibilidad de los resultados de medida que apoye al desarrollo económico y social. Clave para la economía de libre mercado.
- La necesidad de contar con un sistema global de medida para la armonización internacional de unidades físicas, normas de productos, procedimientos de calibración, evaluación de incertidumbres, etc. Clave para el desarrollo científico y la transparencia en el comercio.

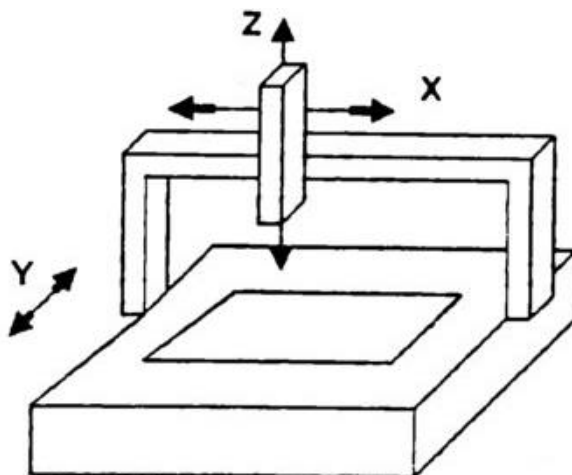
Una CMM, también conocida como máquina de medición de coordenadas o máquina de medición tridimensional, es un equipo que mide las geometrías de objetos físicos con gran precisión milimétrica y que utiliza un sistema de coordenadas para describir sus movimientos (Figura 4).



*Figura 4. Máquina de medir de coordenadas*

Existen dos tipos de sistemas de coordenadas en el ámbito de la medición con máquinas CMM. El primero se denomina Sistema de coordenadas de la máquina (Figura 5). En él, los ejes X, Y y Z se refieren a los movimientos de la máquina. Al visualizarlos desde la parte frontal de la

máquina, el eje X se encuentra de izquierda a derecha, el eje Y se encuentra de adelante hacia atrás y el eje Z se encuentra de arriba hacia abajo, verticalmente y de forma perpendicular a los otros dos.



*Figura 5. Sistema de coordenadas de la CMM*

El segundo sistema de coordenadas se denomina Sistema de coordenadas de la pieza, en el cual los tres ejes están en relación con los datum (ubicaciones de la pieza) o elementos de la pieza de trabajo.

Antes de la introducción del software de computadora para la medición por coordenadas, las piezas se alineaban físicamente de forma paralela a los ejes de la máquina para que los sistemas de coordenadas de la máquina y de la pieza quedaran paralelos entre sí. Este procedimiento era muy tardado y no muy preciso. Cuando la pieza era redonda o con contornos complejos en vez de ser cuadrada o rectangular, la tarea de medición resultaba casi imposible.

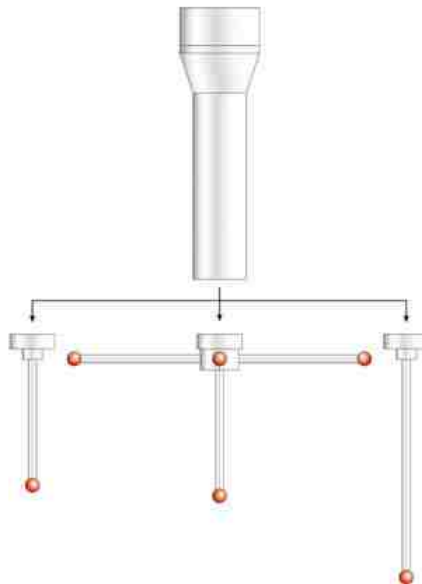
En la actualidad la CMM mide los datum de la pieza de trabajo, establece el sistema de coordenadas de la pieza y matemáticamente la relaciona con el sistema de coordenadas de la máquina.

En su uso como equipo de medición por contacto, la máquina de medición de coordenadas utiliza una sonda electrónica (Figura 6) muy sensible para medir una serie de puntos discretos de la geometría de una parte sólida. Estas mediciones se utilizan para confirmar la conformidad de la pieza con las especificaciones.



*Figura 6. Sonda electrónica*

Las piezas por medir se montan de forma segura en una mesa sólida, generalmente de granito, que se ha rectificado. Las sondas, que vienen en diferentes tamaños y tipos (Figura 7), están montadas en un vástago con resorte (Figura 8) que a su vez está unido a un cabezal y este está conectado a un pórtico que se mueve en un plano de coordenadas XYZ.



*Figura 7. Diferentes tamaños y tipos de sondas.*



*Figura 8. Sonda montada sobre un vástago con resorte*

La sonda también puede girar de forma independiente para acceder a las diferentes características de la pieza (Figura 9). Todos los movimientos del pórtico y de la sonda pueden controlarse manualmente mediante un joystick o programarse automáticamente. Esto hace que la CMM sea una verdadera máquina controlada por ordenador.



*Figura 9. Movimiento independiente de la sonda respecto al pórtico*

Las técnicas para la inspección metrológica sin contacto, utilizando el haz láser como fuente para obtener con precisión las coordenadas de puntos correspondientes a una pieza o modelo, han evolucionado mucho en los últimos años. De hecho, hasta hace poco, era muy excepcional

el uso de esta tecnología fuera del ámbito de la investigación, llevada a cabo en universidades o en industrias de muy alta componente tecnológica. Hoy en día sin embargo asistimos a un renacimiento de los sistemas de medida sin contacto (tanto 2D como 3D) al incorporarse a esta tecnología, por precio y prestaciones (velocidad, capacidad de captura de puntos, calidad de los mismos, etc.), industrias con productos y requerimientos de alta precisión, con necesidades de fabricación de alta calidad en plazos muy cortos (cadencia de piezas muy elevada) o con piezas o productos de elevado tamaño o de geometrías complicadas (con problemas de medición por métodos tradicionales). Todos ellos han migrado hacia la inspección sin contacto.

La clave en la implantación de estos sistemas sin contacto se debe sin duda al uso de haz láser como elemento que aporta precisión además de velocidad. El hecho de utilizar una luz relativamente barata, coherente y monocromática, unido a tamaños muy reducidos de punto (*spot*) conseguidos con lentes ópticas, hacen del láser la herramienta ideal para el digitalizado sin contacto. Además, existe una doble vertiente de aplicaciones de la técnica de digitalizado: se puede aplicar tanto en tareas de inspección como de ingeniería inversa. En el primer caso se trata de comprobar las posibles desviaciones de un componente fabricado con respecto a un modelo CAD existente. En el segundo caso, se obtiene un modelo CAD (presuponiendo que no existe), por medio del digitalizado de un prototipo existente. En ambos casos esta tecnología aporta una elevada velocidad de adquisición de datos, del orden de miles de puntos por segundo (hoy se barajan cantidades del orden de 60000 puntos o más) lo que permite que las reducciones de tiempo de trabajo sean muy elevadas y, en consecuencia, también la reducción de los costes asociados al proceso de inspección.

La mayoría de los sensores láser por triangulación (*LTS, Laser Triangulation Sensor*) para aplicaciones de ingeniería inversa presentan el mismo diseño constructivo. En la construcción de este tipo de sistemas, la fuente de luz y el sensor no están alineados, sino que forman un cierto ángulo que se denomina ángulo de triangulación. La fuente de luz proyecta un rayo sobre la superficie de la pieza, y el fotodetector recoge la luz reflejada y/o la luz difusa sobre la superficie de la pieza. Como se conoce la dirección de propagación del rayo, para obtener la posición en el espacio del punto que se está digitalizando, sólo se necesita determinar la distancia a la que el rayo incide sobre la superficie de la pieza. Esta distancia se determina con la lectura del fotodetector y el ángulo de triangulación [12]. La Figura 10 muestra los



parámetros geométricos y constructivos que definen el campo de actuación y la precisión de este sistema.

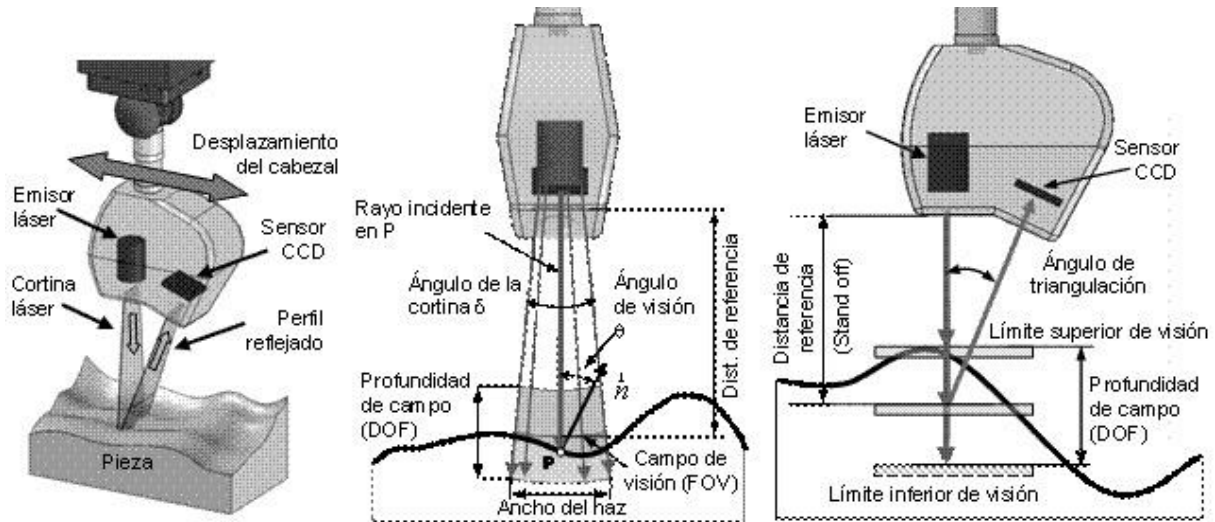


Figura 10. Parámetros geométricos y constructivos de un LTS

La geometría constructiva del sistema permite definir una serie de parámetros geométricos no modificables, como son la distancia de referencia o de focalización (*stand-off*), el ángulo de triangulación o ángulo entre el haz incidente y el reflejado, y la profundidad de campo (*Depth of Field, DOF*). El campo de visión (*Field of view, FOV*) del sensor está definido por la profundidad de campo y el ancho del haz [13]. A continuación, se presenta una breve descripción de los principales parámetros:

- **Profundidad de Campo, DOF (*Depth of Field*):** Es el rango de alturas o profundidades, en el cual el sensor es capaz de recoger puntos sobre la superficie digitalizada.
- **Ancho del haz láser:** Es el ancho de la cortina láser medido en la posición media de la profundidad de campo.
- **Campo de Visión, FOV (*Field of view*):** Es la región dentro de la cual, el sensor es capaz de recoger puntos sobre la superficie digitalizada. Está definida por la profundidad de campo y el ancho del haz.
- **Distancia de Referencia (*Stand off*):** Es la distancia desde el cabezal sensor hasta la superficie de referencia situada en la zona media del campo de medida. Con esta altura del sensor el haz láser está enfocado sobre la superficie de referencia y obtiene los puntos de mayor calidad.



- **Ángulo de visión ( $\theta$ ):** ángulo entre el rayo del haz láser que incide en un punto de la superficie digitalizada y la normal en dicho punto a la superficie. Depende de la orientación del sensor sobre la pieza.
- **Ángulo de Triangulación:** Es el ángulo que forma la cortina láser con el eje de visión del sensor cuando está enfocando a la superficie de referencia. Depende de la geometría constructiva del sensor.
- **Ángulo de la cortina o del campo de visión ( $\delta$ ):** Es el ángulo que forma el campo de visión y define el ancho del haz.
- **Diámetro del *Spot*:** Es el diámetro de los puntos de la cortina láser medido sobre la superficie de referencia. Depende del ángulo de la superficie con el haz incidente.
- **Distancia entre puntos:** Es la distancia entre los puntos digitalizados, medida sobre una misma línea de barrido del láser.
- **Distancia entre líneas de barrido:** Es la distancia entre las distintas líneas de digitalizado
- **Velocidad de adquisición de datos:** cantidad de puntos captados por unidad de tiempo.

#### 1.4.1.2. Equipos por contacto

La medición por contacto de las esferas se llevó a cabo con una máquina CMM modelo DEA Global Image 091508 [14] (Figura 11) cuyas dimensiones máximas de trabajo son  $X=900$  mm,  $Y=1500$  mm y  $Z=800$  mm, con una incertidumbre expandida de  $U = 2,2 + 3L/1000 \mu\text{m}$  y con certificado de calibración ENAC según ISO 10360-2 [15].

El motivo de haber elegido una CMM para realizar las medidas por contacto de esta experimentación es debido a que se busca una alto grado de repetibilidad en una precisión muy elevada (en el rango de la micra), por lo tanto, se busca eliminar en lo máximo de lo posible errores sistemáticos de la medida y errores aleatorios producidos por factores externos, como el error debido al operador.

En la mayoría de los procesos de medición la habilidad que posee el operador para efectuar las medidas, así como factores como el cansancio ocular o la fatiga física influyen directamente en los resultados de la medición. Utilizando este equipo de medición prácticamente se elimina el error en la medida debido al operador ya que se minimiza la intervención del usuario en el

proceso de obtención de datos, al poder programar y automatizar las operaciones de medición. De esta forma se eliminan errores de mal posicionamiento del instrumento respecto a la pieza a medir, así como también errores de paralaje o de lectura de las medidas.

Sobre la CMM se montó el cabezal Renishaw SP25 [16]. El palpador usado fue una esfera de 1,5 mm de diámetro de rubí montado sobre el cabezal SP25 (Figura 12). La elección de esta punta, condicionada por el tamaño de vástago y el diámetro de la bola, se considera idónea para medir los tres tamaños de esferas sin cambiar de palpador y así asegurar una mayor uniformidad de los resultados obtenidos a través de los distintos conjuntos, intentando minimizar la posible influencia en las mediciones de factores externos. El software de control que se utilizó es PC-DMIS 2018 R2® [17].



*Figura 11. Máquina CMM*



Figura 12. Sonda de palpado

#### 1.4.1.3. Equipos sin contacto

El equipo usado en la medición sin contacto fue el sensor láser de triangulación de Hexagon Metrology, modelo HP-L-10.6® [18] (Figura 13) montado en la CMM DEA Global Image 091508. Es un sensor con valores de *Stand-off* y *Depth of Field* de  $170 \pm 30$  mm (distancia óptima relativa a la entidad que se pretende evaluar), 53 Hz (líneas por segundo completadas durante las mediciones) y tres anchuras de línea posibles (24/60/123 mm). El software con el cual se realizó el proceso de captación de las nubes de puntos de los conjuntos fue el PC-DMIS 2018 R2®, ya que, al estar el sensor láser montado sobre la máquina de medición por coordenadas, es el propio software de control de la CMM el que permite ejecutar los programas de escaneo láser. Sin embargo, desde este software no es posible procesar las nubes de puntos, por lo tanto, para obtener información a partir de los puntos capturados, es necesario utilizar el software Geomagic Control X® [19]. Las mediciones realizadas con el equipo láser tuvieron lugar en el mismo laboratorio que la medición por contacto y a una temperatura controlada de  $20^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  como indica la norma.



Figura 13. Sensor láser de triangulación HP-L-10.6®

#### 1.4.2. Fabricación de muestras de ensayo

El diseño elegido para la materialización de las placas de ensayo ha sido el de una pletina base de acero inoxidable AISI 316 sobre la que se han colocado 10 esferas de un mismo diámetro. Se fabricaron en total 3 conjuntos: uno con esferas de  $\varnothing 10$  mm, otro con esferas de  $\varnothing 18$  mm y el tercero con esferas de  $\varnothing 25$  mm.

El primer paso que se realizó fue el arenado de las placas base con el objetivo de evitar reflejos de la propia placa sobre las esferas. Se utilizó la máquina de chorreado Sablex S-2 y se programó para trabajar a una presión constante de 4 bares. El abrasivo que se utilizó fue el óxido de alúmina WFA F100.

Para realizar la unión de las esferas a la placa base se consultó con el personal del taller de la EPI y se decidió realizar una unión por atornillado, utilizando un taladro para materializar los agujeros en la placa base y en las esferas. A la hora de realizar el taladrado de las esferas de precisión se utilizaron dos mordazas hemisféricas como método de sujeción, de forma que la broca no produjo marcas ni deformaciones permanentes sobre la superficie de las esferas. Posteriormente cada agujero de la esfera fue roscado lo que permitió el montaje (atornillado) de las 10 esferas sobre cada placa. Todas las esferas utilizadas en la experimentación fueron fabricadas en acero inoxidable AISI 316, de calidad grado G100, con una esfericidad menor de  $2,5 \mu\text{m}$  y una rugosidad media aritmética  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ .

### 1.4.3. Medición pre-tratamiento químico

#### 1.4.3.1. Medición por contacto

Para la medición por contacto se utilizó un utillaje modular (Figura 14) siguiendo el principio de 3, 2, 1 para eliminar grados de libertad (desplazamientos y giros de la placa) de manera más eficiente. Los elementos de sujeción que se utilizaron fueron los mismos para los tres conjuntos de esferas de diferentes tamaños, la única modificación que tuvo lugar fue variar la separación entre elementos de utillaje para adaptarse a las diferencias de tamaño de las placas.



*Figura 14. Sujeción con utillaje modular para medición por contacto pre-ácido*

Para validar la exactitud en la medición por contacto es necesario realizar una cualificación del palpador, utilizando una esfera de precisión (Figura 15). En este proceso se comparan los valores obtenidos por nuestro palpador, al medir la esfera patrón, con los valores reales de la esfera suministrados por el fabricante (trazabilidad). Este proceso se repite cada vez que se vuelve a encender la CMM.



*Figura 15. Cualificación del palpador*

Utilizando el programa de control de la CMM, PC-DMIS 2018 R2®, se realizan las mediciones por contacto. Desde este software se extraen los datos sobre los diámetros y errores de forma de las esferas. Se realizaron 5 mediciones por contacto de cada uno de los 3 conjuntos. Con las 5 medidas de cada esfera se realiza un cómputo donde se expresa la media de las medidas de cada esfera (Tabla 2).

Tabla 2. *Computo de las medidas de las esferas por contacto (Pre-ácido)*

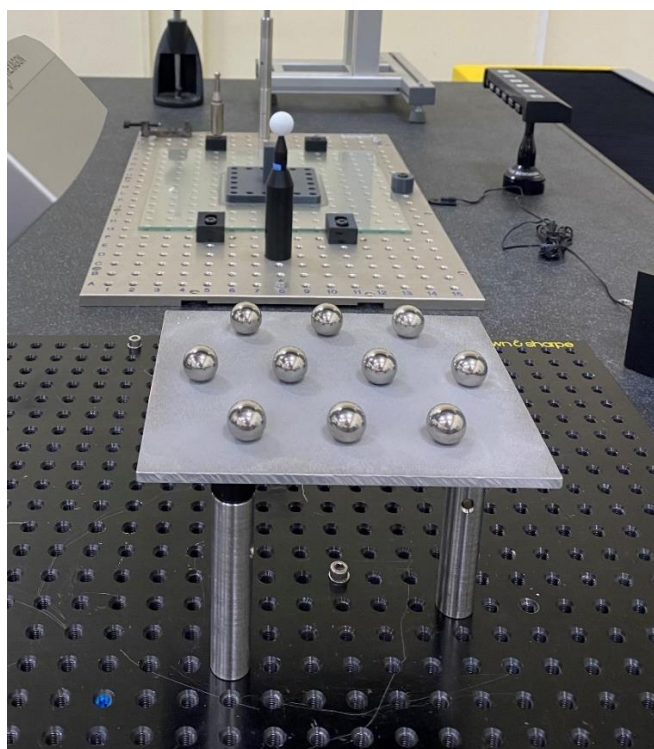
| CMM (PRE-ÁCIDO)          |        |                |                      |
|--------------------------|--------|----------------|----------------------|
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 10mm | ESFERA | Diámetro medio | Error de Forma medio |
|                          | SPH 1  | 10,00256       | 0,0018               |
|                          | SPH 2  | 10,00182       | 0,0032               |
|                          | SPH 3  | 10,0015        | 0,0017               |
|                          | SPH 4  | 10,00174       | 0,0024               |
|                          | SPH 5  | 10,00148       | 0,0027               |
|                          | SPH 6  | 10,00174       | 0,002                |
|                          | SPH 7  | 10,00182       | 0,0015               |
|                          | SPH 8  | 10,0016        | 0,002                |
|                          | SPH 9  | 10,00184       | 0,0026               |
|                          | SPH 10 | 10,00184       | 0,002                |
| CMM (PRE-ÁCIDO)          |        |                |                      |
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 18mm | ESFERA | Diámetro medio | Error de Forma medio |
|                          | SPH 1  | 18,0062        | 0,0016               |
|                          | SPH 2  | 18,00814       | 0,0024               |
|                          | SPH 3  | 18,00124       | 0,0021               |
|                          | SPH 4  | 18,00706       | 0,0024               |
|                          | SPH 5  | 18,00844       | 0,0023               |
|                          | SPH 6  | 18,00858       | 0,0014               |
|                          | SPH 7  | 18,00634       | 0,0022               |
|                          | SPH 8  | 18,00594       | 0,0026               |
|                          | SPH 9  | 18,00662       | 0,0019               |
|                          | SPH 10 | 18,00652       | 0,0017               |
| CMM (PRE-ÁCIDO)          |        |                |                      |
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 25mm | ESFERA | Diámetro medio | Error de Forma medio |
|                          | SPH 1  | 25,00888       | 0,0065               |
|                          | SPH 2  | 24,99478       | 0,0023               |
|                          | SPH 3  | 25,01058       | 0,0061               |
|                          | SPH 4  | 25,00886       | 0,0029               |
|                          | SPH 5  | 25,00964       | 0,0051               |
|                          | SPH 6  | 25,00938       | 0,0051               |
|                          | SPH 7  | 25,00848       | 0,005                |
|                          | SPH 8  | 25,00928       | 0,0044               |
|                          | SPH 9  | 25,01022       | 0,0063               |
|                          | SPH 10 | 25,00952       | 0,0056               |

#### 1.4.3.2. Medición sin contacto

El sistema de sujeción de los conjuntos de placas y esferas que se adaptó para en el caso de la medición sin contacto es el que se muestra en la Figura 16, que consiste en una sujeción de apoyo simple, donde la pletina es soportada por 3 varillas de 15 cm. En esta fase de medición se buscaba una disposición donde se permitiese el acceso del láser de triangulación a



la geometría esférica de los elementos a medir, en su totalidad y sin obstrucciones, desde los ángulos y orientaciones que se determinaran más adelante, y donde se garantizara una distancia relativa óptima desde el sensor al conjunto, de manera que se estuviera operando dentro del rango especificado por el fabricante de  $170 \pm 30$  mm.

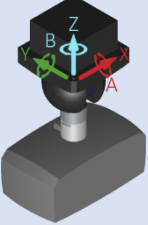
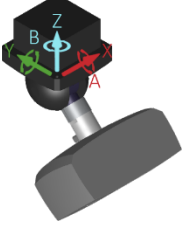
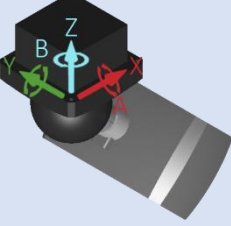
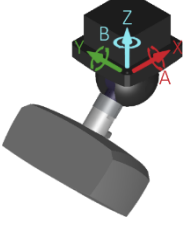
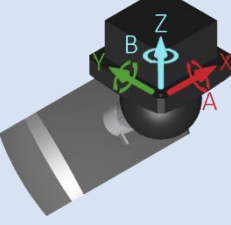


*Figura 16. Sujeción de apoyo simple para medición sin contacto*

Para cumplir el objetivo del escaneo, de forma que se consiga cubrir por completo las entidades evaluadas, se realizaron varios escaneos con 5 orientaciones diferentes del cabezal láser (Tabla 3). La elección de estas 5 orientaciones se debe a la experiencia en investigaciones previas con este equipo [8] en las cuales se demostró que estas 5 orientaciones eran las necesarias y suficientes para escanear por completo una pieza.

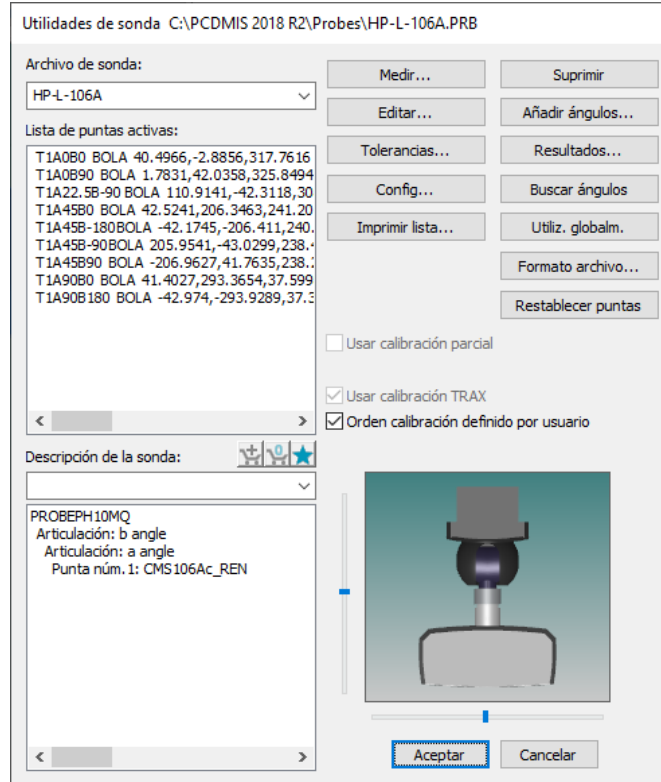


*Tabla 3. Orientaciones usadas para el escaneo con el equipo HP-L-10.6®*

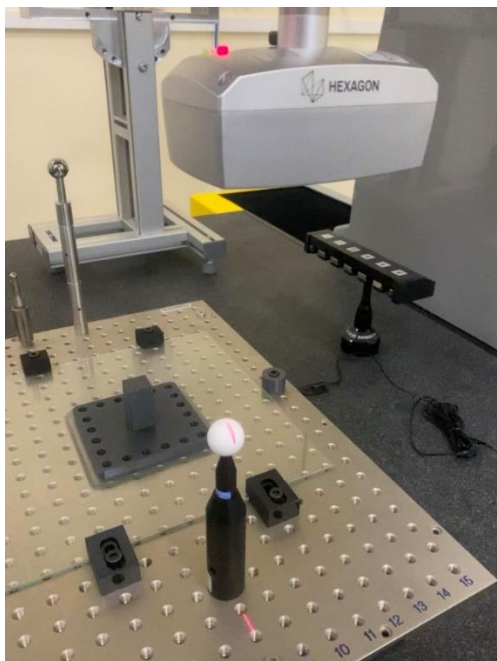
| Orientación | Representación Esquemática   |
|-------------|--|
| A0B0        |   |
| A45B0       |    |
| A45B90      |   |
| A45B-90     |  |
| A45B-180    |  |

Al igual que ocurría cuando se realizaban las mediciones por contacto, cada vez que se encienda la CMM será necesario realizar una cualificación, esta vez del sensor láser, en cada una de las

orientaciones que van a ser utilizadas (Figura 17). Para este caso, se utilizará una esfera de precisión de cerámica, blanca y de acabado mate, como se muestra en la Figura 18.



*Figura 17. Lista de posiciones que se van a cualificar*



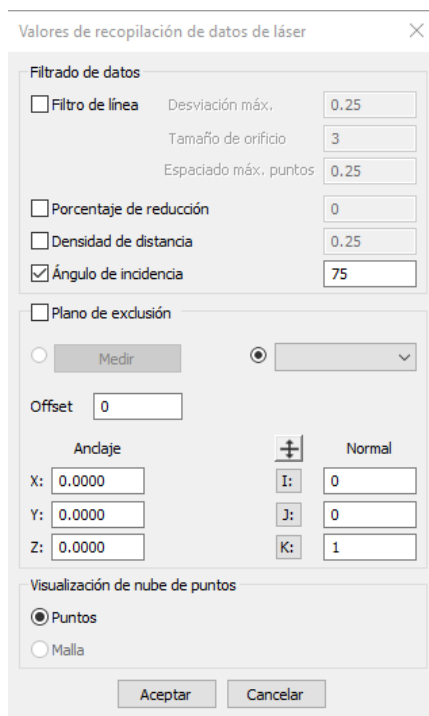
*Figura 18. Cualificación del sensor láser*

En todas las orientaciones se usaron los mismos parámetros de escaneo (Figura 19): ganancia alta (sensibilidad baja del sensor láser), densidad de puntos de 16,8 pto/mm y anchura de 123 mm. Esta configuración láser se considera la más adecuada para la medición de los conjuntos. Por un lado, el parámetro de anchura permite capturar la mayor área posible en una pasada. El parámetro de densidad de puntos es el estándar o de configuración media, además del empleado por el escáner en la cualificación (el sensor siempre realiza la cualificación con los parámetros de densidad de puntos de 16,8 puntos/mm y anchura de 60 mm, valores medios). Por último, es importante destacar que las mediciones realizadas con el sensor láser de triangulación en el estado original se realizaron con parámetros de sensibilidad baja (ganancia alta), ya que se trata de una superficie escaneada que presenta brillos y es necesario utilizar una baja sensibilidad del sensor para poder capturar suficientes puntos en las esferas y poder conformar con gran fiabilidad la geometría esférica que se pretende evaluar.



Figura 19. Configuración parámetros del sensor láser HP-L-10.6® pre-ácido

Otro parámetro importante durante el escaneo son los valores de recopilación de datos de láser, esto son un tipo de filtros que se aplican en tiempo real durante el escaneo, a medida que la pieza está siendo escaneada estos filtros están siendo aplicados automáticamente a la nube de puntos generada. Por defecto viene activo el filtro del ángulo de incidencia con un valor de 75°, al ser una recomendación del fabricante se procede a dejar con este valor y el resto de los filtros se dejan sin activar como aparecen en la Figura 20. El filtro del ángulo de incidencia hace referencia al ángulo con el que son capturados los puntos, el software tiene la información de la orientación del cabezal y también es capaz de detectar el ángulo de la normal de ese punto respecto a la orientación con la que fue capturado. Con estos datos y habiendo fijado el valor del ángulo en 75°, el software eliminará todos los puntos que tengan un ángulo de incidencia mayor de este.



*Figura 20. Valores de recopilación de datos del sensor láser HP-L-10.6®*

Con las orientaciones y parámetros de escaneo definidos se procede a realizar el escaneo de los conjuntos pre-tratamiento con el equipo HP-L-10.6® (Figura 21) utilizando el software de control de CMM, obteniendo finalmente una nube de puntos (Figura 22) que será tratada para poder evaluar en ella las diferentes entidades que la forman y posteriormente realizar el estudio de estas.



Figura 21. Disposición del sensor láser

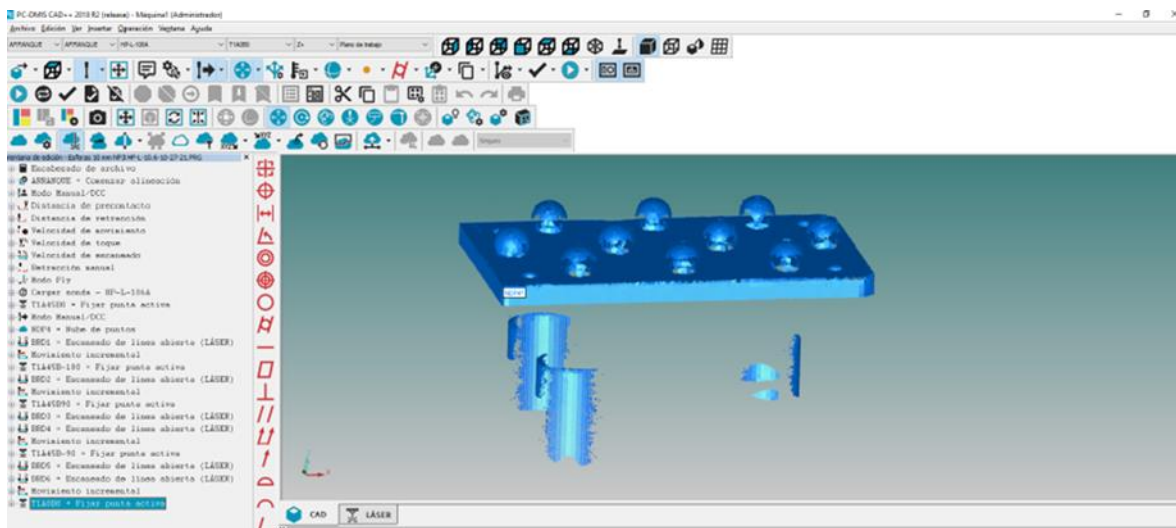
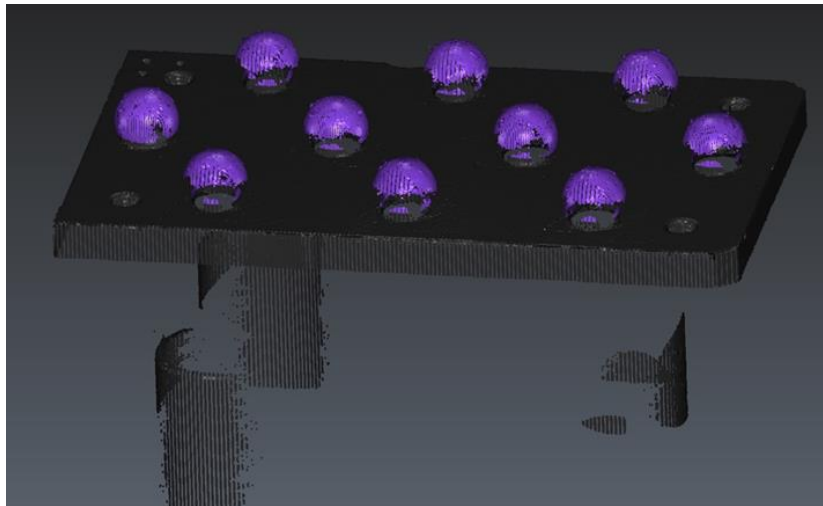


Figura 22. Nube de Puntos generada con el sensor láser en PCDMIS 2018 R2®

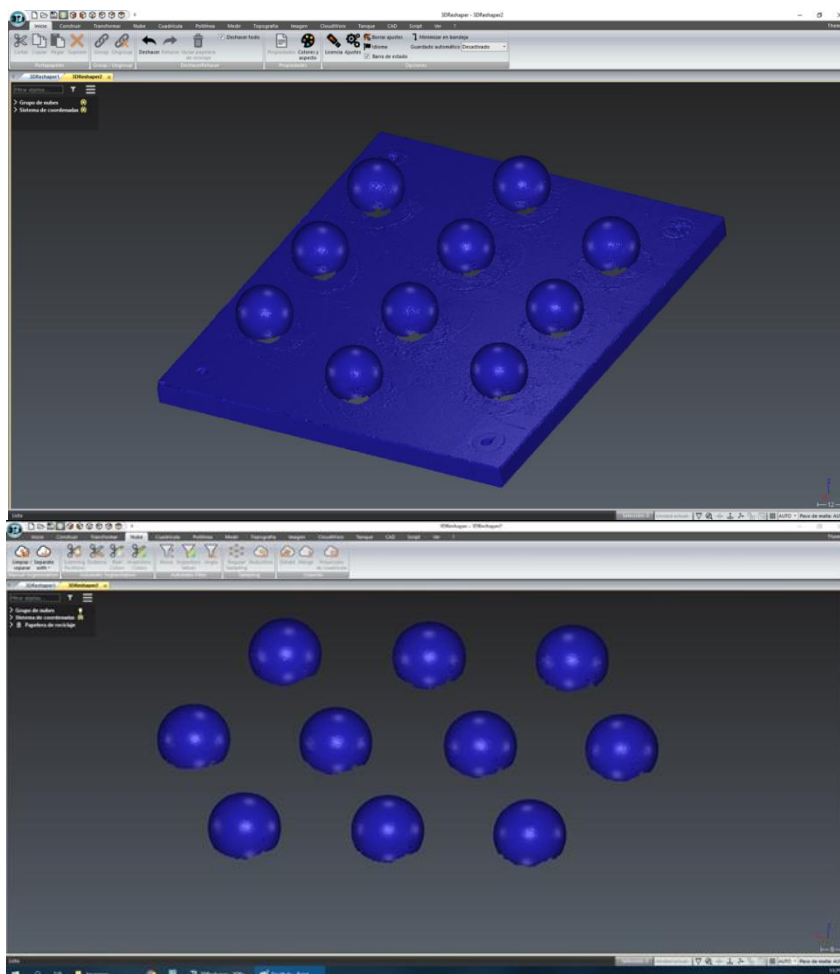
Como se había mencionado anteriormente, la medición mediante CMM se realizó de manera que se obtuvo una nube de puntos de la cual extraer los resultados en vez de obtenerlos de manera directa a través de los elementos automáticos. Con este método se consiguió una metodología de obtención de datos idéntica para los equipos de ingeniería inversa y el equipo de medición por contacto sin importar el software usado. Independientemente del software usado, los resultados obtenidos son los mismos para una misma nube de puntos.

Obtenidas las nubes de puntos en bruto de los diferentes tamaños de esferas, lo primero que se ha de hacer es eliminar los puntos que no pertenecen a las entidades evaluadas, utilizando el programa 3DResahaper® y obtener una nube de puntos que sea similar, en cuanto a área palpada por entidad, a la obtenida mediante CMM. Como se observa en la Figura 23, se busca mantener únicamente los puntos pertenecientes a las esferas, eliminando la parte de la nube de puntos que contiene información sobre la placa base y los apoyos del utillaje.

Este proceso de eliminación de puntos, quedando únicamente los puntos que pertenecen a las entidades evaluadas (Figura 24), se hace de manera idéntica para todas las mediciones de cada uno de los 3 tamaños de esferas.



*Figura 23. Selección de puntos pertenecientes solamente a las esferas*



*Figura 24. Nube de puntos perteneciente al sensor láser antes y después de eliminar los puntos no pertenecientes a las entidades evaluadas en el programa 3DReshaper®.*

Previo a la obtención de los datos de las nubes de puntos se ha realizado un estudio con el fin de determinar el tipo de filtro usado para la creación de las entidades evaluadas. Por anteriores investigaciones realizadas se sabe que el mejor filtro para la creación de entidades en base a nubes de puntos es el de tipo Sigma o Desviación Estándar. Este filtro descarta los puntos que se encuentran a una distancia superior a la de  $x$  veces la desviación estándar de la nube de puntos perteneciente a una entidad.

Sabiendo que el tipo de filtro usado será el de Desviación Estándar, se realiza un estudio previo con el fin de evaluar cual es el factor que se va a aplicar a este filtro para la creación de las diferentes entidades evaluadas. Para ello se tomó la nube de puntos del equipo HP-L-10.6 y se analizó sobre ella la evolución de aplicar diferentes factores de multiplicación al filtro Sigma



sobre una esfera escogida al azar. Los parámetros que se evaluaron en función del filtro Sigma fueron el diámetro y el error de forma.

El estudio del filtro se realizó con la ayuda del software Geomagic Control X®. La metodología que se ha usado para la aplicación del filtro tipo Sigma es la siguiente:

- Selección de una esfera cualquiera.
- Creación de la entidad sin ningún tipo de filtro.
- Obtención de la desviación estándar de la entidad.
- Multiplicación de la desviación estándar por el factor que se quiera aplicar en ese momento.
- Creación de la nueva entidad aplicando el filtro tipo: Distancia máxima entre puntos, en el cual el valor de la distancia es el calculado anteriormente para la desviación estándar después de multiplicar esta por el factor deseado.

Los datos que se obtienen al realizar las operaciones detalladas se recogen en la siguiente tabla:

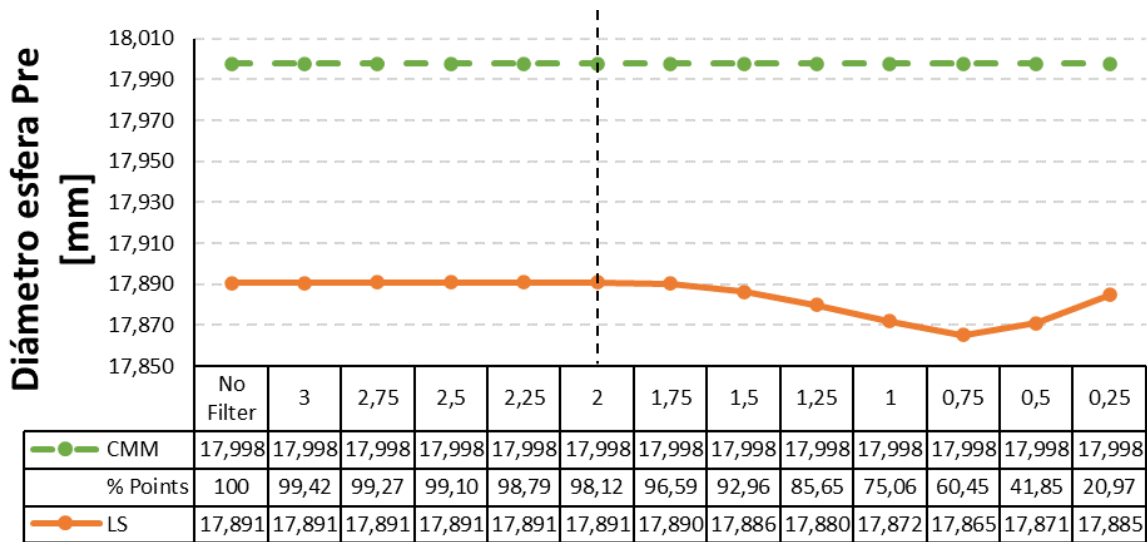
*Tabla 4. Valores del diámetro, número de puntos y error de forma obtenidos según el Filtro Sigma aplicado*

| PRE SPH 5 GANANCIA ALTA |        |          |        |            |           |       |               |        |       |       |
|-------------------------|--------|----------|--------|------------|-----------|-------|---------------|--------|-------|-------|
| Sigma                   |        | Diametro |        |            | Puntos    |       | Erro de forma |        |       |       |
|                         |        | CMM      | Medido | Desviacion | Nº Puntos | %     | CMM           | Min    | Max   | Total |
| No Filter               | 0,0393 | 17,998   | 17,891 | -0,107     | 37069     | 100   | 0,002         | -0,616 | 0,648 | 1,264 |
| <b>3</b>                | 0,1179 | 17,998   | 17,891 | -0,107     | 36854     | 99,42 | 0,002         | -0,118 | 0,117 | 0,235 |
| <b>2,75</b>             | 0,1081 | 17,998   | 17,891 | -0,107     | 36800     | 99,27 | 0,002         | -0,108 | 0,108 | 0,216 |
| <b>2,5</b>              | 0,0983 | 17,998   | 17,891 | -0,107     | 36734     | 99,10 | 0,002         | -0,097 | 0,098 | 0,195 |
| <b>2,25</b>             | 0,0884 | 17,998   | 17,891 | -0,107     | 36621     | 98,79 | 0,002         | -0,088 | 0,088 | 0,177 |
| <b>2</b>                | 0,0786 | 17,998   | 17,891 | -0,107     | 36372     | 98,12 | 0,002         | -0,079 | 0,079 | 0,157 |
| <b>1,75</b>             | 0,0688 | 17,998   | 17,890 | -0,108     | 35804     | 96,59 | 0,002         | -0,069 | 0,069 | 0,138 |
| <b>1,5</b>              | 0,0590 | 17,998   | 17,886 | -0,112     | 34459     | 92,96 | 0,002         | -0,059 | 0,059 | 0,118 |
| <b>1,25</b>             | 0,0491 | 17,998   | 17,880 | -0,118     | 31749     | 85,65 | 0,002         | -0,050 | 0,050 | 0,099 |
| <b>1</b>                | 0,0393 | 17,998   | 17,872 | -0,126     | 27825     | 75,06 | 0,002         | -0,040 | 0,041 | 0,082 |
| <b>0,75</b>             | 0,0295 | 17,998   | 17,865 | -0,133     | 22410     | 60,45 | 0,002         | -0,030 | 0,032 | 0,062 |
| <b>0,5</b>              | 0,0197 | 17,998   | 17,871 | -0,127     | 15515     | 41,85 | 0,002         | -0,020 | 0,021 | 0,041 |
| <b>0,25</b>             | 0,0098 | 17,998   | 17,885 | -0,113     | 7775      | 20,97 | 0,002         | -0,010 | 0,010 | 0,020 |

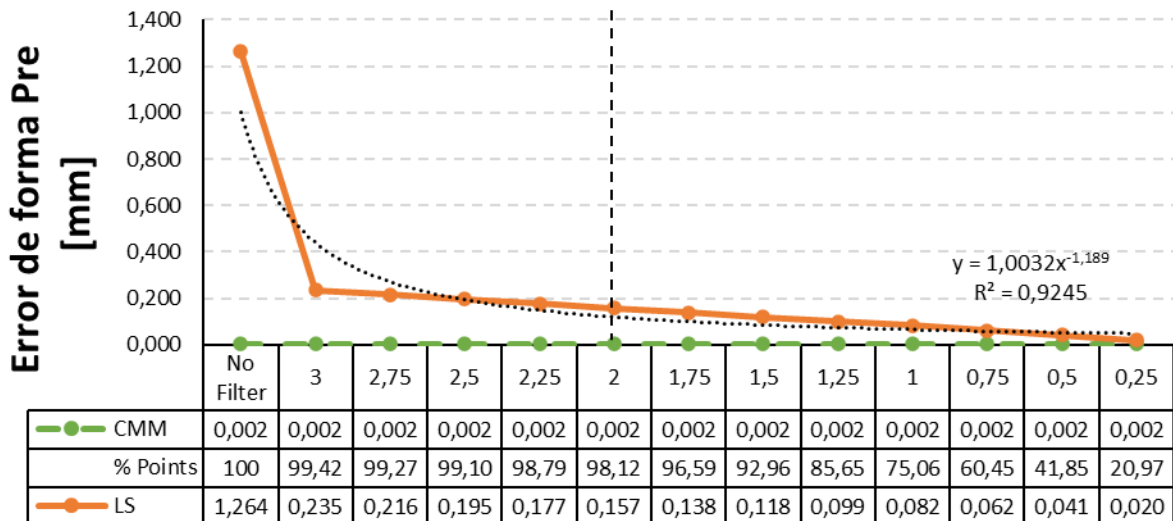
El motivo de esta metodología es debido a que el filtro de desviación estándar que trae por defecto el software no obtiene los resultados que se cabría esperar, como se demostró en otras investigaciones. Es por esto por lo que se aplica el filtro de esta manera.

También se trata de la mejor manera posible de asegurarse que el filtro tipo Sigma está siendo bien aplicado, ya que siguiendo esta metodología de trabajo se usa la propia definición matemática de la desviación estándar para aplicarlo.

Con todo esto se realizaron las gráficas (Figura 25 y Figura 26) en las que se puede observar la evolución del filtro para los diferentes parámetros, así como el porcentaje de puntos respecto al total que se mantienen en la creación de las entidades para cada uno de los valores de la desviación estándar.



*Figura 25. Evolución del diámetro según el factor multiplicador del filtro Sigma o desviación estándar*



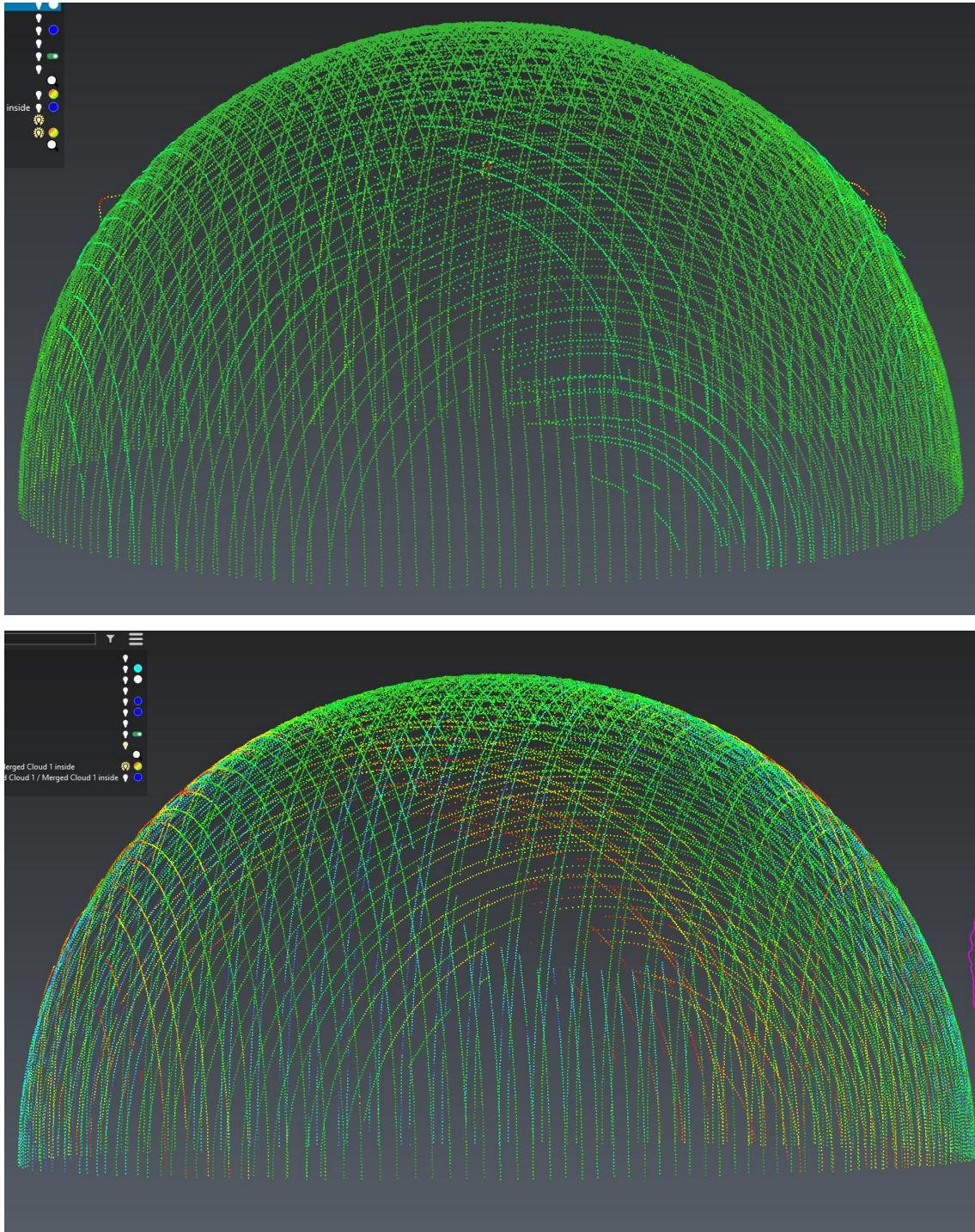
*Figura 26. Evolución del error de forma según el factor multiplicador del filtro Sigma o desviación estándar.*

De las gráficas anteriores se concluye, que a medida que se vuelve más restrictivo el filtro aplicado y se eliminan más puntos, los valores de error de forma del láser se aproximan a los

valores de CMM. Pero no así los valores de diámetro o ángulo que evolucionan de manera diferente, como se observan en las gráficas.

El diámetro y ángulo tienen una evolución que siempre converge en el mismo valor, el valor sin filtro, pero que en ningún caso se aproxima al valor de CMM en algún punto de su evolución. Hace lo contrario, se aleja cada vez más del valor de CMM para luego volver a su valor original.

Con estos datos se decidió que el mejor factor de multiplicación para el filtro Sigma o desviación estándar sería de 2. Las entidades se construyen aproximadamente con el 96% de los puntos (Figura 27) lo que hace que se descarten los posibles puntos espurios (Figura 28), y los valores de los parámetros evaluados están dentro de unos valores aceptables. Se asegura que se eliminan puntos que pueden dar lugar a datos erróneos, pero sin llegar a eliminar puntos en exceso y falsear las medidas de los equipos.



*Figura 27. Antes y después de la aplicación del filtro 2 Sigma en una esfera*



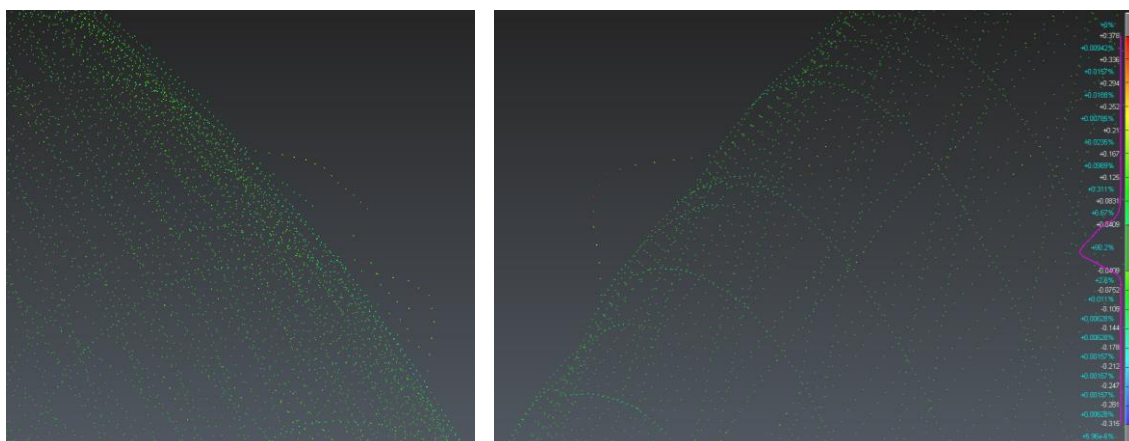


Figura 28. Puntos espurios pertenecientes a una esfera

Con el factor de multiplicación del valor Sigma igual a 2 que se ha determinado se procede a calcular el valor del filtro (Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7) que se aplicará a cada una de las esferas.

Tabla 5. Cálculo del Filtro Sigma para las esferas de 10mm

| Esfera | 10 mm    |               |          |               |          |               |
|--------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|
|        | Medida 1 |               | Medida 2 |               | Medida 3 |               |
|        | Sigma    | 2 Sigma       | Sigma    | 2 Sigma       | Sigma    | 2 Sigma       |
| SPH 1  | 0,168    | <b>0,336</b>  | 0,098    | <b>0,196</b>  | 0,1629   | <b>0,3258</b> |
| SPH 2  | 0,1635   | <b>0,327</b>  | 0,087    | <b>0,174</b>  | 0,1571   | <b>0,3142</b> |
| SPH 3  | 0,129    | <b>0,258</b>  | 0,0511   | <b>0,1022</b> | 0,1129   | <b>0,2258</b> |
| SPH 4  | 0,042    | <b>0,084</b>  | 0,0442   | <b>0,0884</b> | 0,0457   | <b>0,0914</b> |
| SPH 5  | 0,1014   | <b>0,2028</b> | 0,054    | <b>0,108</b>  | 0,0969   | <b>0,1938</b> |
| SPH 6  | 0,1353   | <b>0,2706</b> | 0,0604   | <b>0,1208</b> | 0,13     | <b>0,26</b>   |
| SPH 7  | 0,1672   | <b>0,3344</b> | 0,0794   | <b>0,1588</b> | 0,1582   | <b>0,3164</b> |
| SPH 8  | 0,1591   | <b>0,3182</b> | 0,0618   | <b>0,1236</b> | 0,143    | <b>0,286</b>  |
| SPH 9  | 0,1677   | <b>0,3354</b> | 0,0809   | <b>0,1618</b> | 0,1646   | <b>0,3292</b> |
| SPH 10 | 0,1706   | <b>0,3412</b> | 0,054    | <b>0,108</b>  | 0,1664   | <b>0,3328</b> |

Tabla 6. Cálculo del Filtro Sigma para las esferas de 18mm

| Esfera | 18 mm    |               |          |               |          |               |
|--------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|
|        | Medida 1 |               | Medida 2 |               | Medida 3 |               |
|        | Sigma    | 2 Sigma       | Sigma    | 2 Sigma       | Sigma    | 2 Sigma       |
| SPH 1  | 0,0314   | <b>0,0628</b> | 0,0356   | <b>0,0712</b> | 0,042    | <b>0,084</b>  |
| SPH 2  | 0,03     | <b>0,06</b>   | 0,0351   | <b>0,0702</b> | 0,0415   | <b>0,083</b>  |
| SPH 3  | 0,0305   | <b>0,061</b>  | 0,0359   | <b>0,0718</b> | 0,042    | <b>0,084</b>  |
| SPH 4  | 0,031    | <b>0,062</b>  | 0,0383   | <b>0,0766</b> | 0,0411   | <b>0,0822</b> |
| SPH 5  | 0,0315   | <b>0,063</b>  | 0,0372   | <b>0,0744</b> | 0,0402   | <b>0,0804</b> |
| SPH 6  | 0,0325   | <b>0,065</b>  | 0,0398   | <b>0,0796</b> | 0,0407   | <b>0,0814</b> |
| SPH 7  | 0,0304   | <b>0,0608</b> | 0,0393   | <b>0,0786</b> | 0,0411   | <b>0,0822</b> |
| SPH 8  | 0,0315   | <b>0,063</b>  | 0,0363   | <b>0,0726</b> | 0,0417   | <b>0,0834</b> |
| SPH 9  | 0,0295   | <b>0,059</b>  | 0,035    | <b>0,07</b>   | 0,0418   | <b>0,0836</b> |
| SPH 10 | 0,0297   | <b>0,0594</b> | 0,0351   | <b>0,0702</b> | 0,0413   | <b>0,0826</b> |

Tabla 7. Cálculo del Filtro Sigma para las esferas de 25mm

| Esfera | 25 mm    |               |          |               |          |               |
|--------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|
|        | Medida 1 |               | Medida 2 |               | Medida 3 |               |
|        | Sigma    | 2 Sigma       | Sigma    | 2 Sigma       | Sigma    | 2 Sigma       |
| SPH 1  | 0,0312   | <b>0,0624</b> | 0,0402   | <b>0,0804</b> | 0,0425   | <b>0,085</b>  |
| SPH 2  | 0,0298   | <b>0,0596</b> | 0,0394   | <b>0,0788</b> | 0,0417   | <b>0,0834</b> |
| SPH 3  | 0,0299   | <b>0,0598</b> | 0,0384   | <b>0,0768</b> | 0,0409   | <b>0,0818</b> |
| SPH 4  | 0,0315   | <b>0,063</b>  | 0,0396   | <b>0,0792</b> | 0,0412   | <b>0,0824</b> |
| SPH 5  | 0,0319   | <b>0,0638</b> | 0,0395   | <b>0,079</b>  | 0,0408   | <b>0,0816</b> |
| SPH 6  | 0,0298   | <b>0,0596</b> | 0,0392   | <b>0,0784</b> | 0,0415   | <b>0,083</b>  |
| SPH 7  | 0,0315   | <b>0,063</b>  | 0,0396   | <b>0,0792</b> | 0,041    | <b>0,082</b>  |
| SPH 8  | 0,0373   | <b>0,0746</b> | 0,04     | <b>0,08</b>   | 0,042    | <b>0,084</b>  |
| SPH 9  | 0,0296   | <b>0,0592</b> | 0,038    | <b>0,076</b>  | 0,0402   | <b>0,0804</b> |
| SPH 10 | 0,0329   | <b>0,0658</b> | 0,0406   | <b>0,0812</b> | 0,0426   | <b>0,0852</b> |

Una vez determinados definitivamente todos los parámetros se procedió a obtener los diámetros, errores de forma, desviaciones estándar y número de puntos de las nubes de puntos de cada una de las mediciones de los diferentes tamaños de. Se realizaron 3 mediciones, en ganancia alta, de cada uno de los tamaños. Después de recoger los valores de cada medición del mismo tamaño se ha realizado un cómputo de los valores medios (Tabla 8).

*Tabla 8. Compuo de las medidas de las esferas con HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Pre-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
|-------------------------------------|--------|----------|----------------|--------------|-------------|---------|--------|
| COMPUTO<br>DIAMETRO 10mm            | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|                                     | SPH 1  | 9,9559   | 0,5615         | 0,0436       | 5594        | -0,2793 | 0,3256 |
|                                     | SPH 2  | 9,9700   | 0,5364         | 0,0442       | 8274        | -0,2681 | 0,3167 |
|                                     | SPH 3  | 9,9693   | 0,3763         | 0,0382       | 6066        | -0,1912 | 0,2273 |
|                                     | SPH 4  | 9,9499   | 0,1749         | 0,0308       | 8506        | -0,0875 | 0,0873 |
|                                     | SPH 5  | 9,9603   | 0,3300         | 0,0368       | 10297       | -0,1640 | 0,1954 |
|                                     | SPH 6  | 9,9607   | 0,4274         | 0,0361       | 6439        | -0,2124 | 0,2623 |
|                                     | SPH 7  | 9,9672   | 0,5279         | 0,0422       | 5636        | -0,2609 | 0,3223 |
|                                     | SPH 8  | 9,9612   | 0,4748         | 0,0397       | 5774        | -0,2350 | 0,2981 |
|                                     | SPH 9  | 9,9751   | 0,5425         | 0,0449       | 7527        | -0,2701 | 0,3296 |
|                                     | SPH 10 | 9,9597   | 0,5087         | 0,0401       | 5558        | -0,2525 | 0,3314 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
| COMPUTO<br>DIAMETRO 18mm            | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|                                     | SPH 1  | 17,8885  | 0,1451         | 0,0291       | 43.119      | -0,0725 | 0,0734 |
|                                     | SPH 2  | 17,8870  | 0,1421         | 0,0290       | 38.969      | -0,0710 | 0,0715 |
|                                     | SPH 3  | 17,8766  | 0,1445         | 0,0297       | 43.284      | -0,0723 | 0,0725 |
|                                     | SPH 4  | 17,8885  | 0,1471         | 0,0299       | 35.998      | -0,0735 | 0,0721 |
|                                     | SPH 5  | 17,8911  | 0,1450         | 0,0290       | 39.722      | -0,0725 | 0,0717 |
|                                     | SPH 6  | 17,8961  | 0,1505         | 0,0304       | 36.898      | -0,0752 | 0,0732 |
|                                     | SPH 7  | 17,8884  | 0,1477         | 0,0301       | 36.067      | -0,0738 | 0,0715 |
|                                     | SPH 8  | 17,8943  | 0,1458         | 0,0297       | 41.711      | -0,0728 | 0,0732 |
|                                     | SPH 9  | 17,8878  | 0,1416         | 0,0289       | 40.152      | -0,0708 | 0,0713 |
|                                     | SPH 10 | 17,8858  | 0,1413         | 0,0286       | 45.279      | -0,0705 | 0,0710 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
| COMPUTO<br>DIAMETRO 25mm            | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|                                     | SPH 1  | 24,8469  | 0,1519         | 0,0318       | 68.561      | -0,0759 | 0,0737 |
|                                     | SPH 2  | 24,8359  | 0,1478         | 0,0312       | 69.669      | -0,0739 | 0,0715 |
|                                     | SPH 3  | 24,8446  | 0,1455         | 0,0301       | 70.141      | -0,0727 | 0,0708 |
|                                     | SPH 4  | 24,8495  | 0,1476         | 0,0313       | 60.736      | -0,0738 | 0,0711 |
|                                     | SPH 5  | 24,8485  | 0,1495         | 0,0312       | 64.704      | -0,0747 | 0,0727 |
|                                     | SPH 6  | 24,8505  | 0,1473         | 0,0309       | 68.831      | -0,0736 | 0,0714 |
|                                     | SPH 7  | 24,8467  | 0,1494         | 0,0315       | 60.395      | -0,0746 | 0,0725 |
|                                     | SPH 8  | 24,8476  | 0,1590         | 0,0320       | 62.881      | -0,0795 | 0,0793 |
|                                     | SPH 9  | 24,8483  | 0,1437         | 0,0303       | 62.685      | -0,0718 | 0,0698 |
|                                     | SPH 10 | 24,8497  | 0,1547         | 0,0317       | 60.019      | -0,0773 | 0,0755 |

#### 1.4.4. Proceso de tratamiento químico

El tratamiento químico se realizó sobre la mesa de trabajo de una sala de laboratorio (Figura 29), adecuadamente ventilada y con el equipamiento protector que se consideró necesario (gafas protectoras, guantes y máscaras contra gases y vapores químicos). En este proceso químico se sometieron las esferas a un baño en solución de agua regia (ácido clorhídrico (HCl) al 37% y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) al 65,7%) a la que se añadieron 8 gr de cloruro de hierro (Fe<sub>3</sub>Cl) para crear tinción (Figura 30). Se decidió utilizar agua regia debido a que esta mezcla es altamente corrosiva, lo cual es necesario para obtener una superficie mate en las esferas. Y, además, al estar solamente compuesta de dos ácidos comunes es una mezcla simple y muy accesible.



*Figura 29. Disposición de los materiales necesarios para realizar el tratamiento*



*Figura 30. Componentes del agua regia*

El proceso del tratamiento químico comienza realizando la mezcla de los componentes. Primero se añadieron 8 gr de cloruro de hierro al recipiente del cristal, después se incorporó el ácido



clorhídrico y seguidamente el ácido nítrico (Figura 31). Para introducir las medidas deseadas se utilizaron vasos de precipitado, uno para cada ácido (por razones de seguridad), de forma que se evite la reacción prematura dentro de uno de los cilindros tabulados.



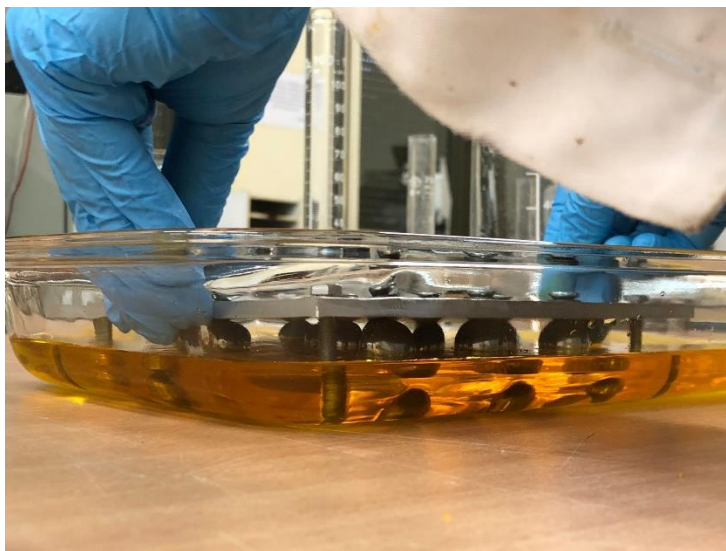
*Figura 31. Proceso de mezcla*

Una vez se introducen todos los componentes del agua regia en el recipiente se utiliza una varilla de agitación, de vidrio macizo, para homogenizar la mezcla. El volumen de la mezcla ha sido calculado de manera que, al introducir los conjuntos en el ácido, este cubre las esferas casi en su totalidad, pero sin llegar a entrar en contacto con la placa base. Para que esto fuese posible se han mecanizado 4 tornillos en cada placa base, a modo de espaciadores, que separan los polos de las esferas del fondo del recipiente (Figura 32).



*Figura 32. Conjuntos con los espaciadores incorporados*

Tras determinar la homogeneidad de la mezcla se comienzan a sumergir los conjuntos en el agua regia (Figura 33). Empezando por el conjunto que contiene las esferas de 25 mm y a continuación, de manera conjunta, las de 18 y 10 mm.



*Figura 33. Esferas siendo sumergidas en la solución de agua regia*

Tras una inmersión de 8 minutos fueron retirados y, a continuación, sumergidos en otro recipiente con agua desionizada (Figura 34), a fin de detener la reacción química y retirar el

ácido de las esferas. Por último, las esferas se secaron al aire. Pasadas 24 horas desde el tratamiento, el aspecto de las esferas es el que se puede observar en la Figura 35, una superficie con menos brillos y de textura distinta a la inicial.



*Figura 34. Recipiente con agua desionizada*



*Figura 35. Detalle de una esfera tras el tratamiento químico*

### **1.4.5. Medición post-tratamiento químico**

#### **1.4.5.1. Medición por contacto**

La medición por contacto post-tratamiento se realizó de manera análoga a la medición pre-tratamiento, con el mismo palpador, en la misma configuración y un utilizando, también, un sistema de sujeción de utillaje modular (Figura 36).



*Figura 36. Sujeción con utillaje modular para medición por contacto post-ácido*



Tras realizar las operaciones de medición desde el software de control se extrajeron las mediciones de las esferas. Se realizaron 5 mediciones por contacto de cada conjunto y se generaron los cálculos de las esferas de los diferentes tamaños medidos (Tabla 9).

Tabla 9. *Computo de las medidas de las esferas por contacto (Post-ácido)*

| CMM (POST-ÁCIDO)         |        |                |                      |
|--------------------------|--------|----------------|----------------------|
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 10mm | ESFERA | Diámetro medio | Error de Forma medio |
|                          | SPH 1  | 9,9627         | 0,0161               |
|                          | SPH 2  | 9,9542         | 0,0247               |
|                          | SPH 3  | 9,9349         | 0,0237               |
|                          | SPH 4  | 9,9722         | 0,0133               |
|                          | SPH 5  | 9,9587         | 0,0205               |
|                          | SPH 6  | 9,9289         | 0,0331               |
|                          | SPH 7  | 9,9378         | 0,036                |
|                          | SPH 8  | 9,9614         | 0,0171               |
|                          | SPH 9  | 9,9493         | 0,0271               |
|                          | SPH 10 | 9,9314         | 0,0357               |
| CMM (POST-ÁCIDO)         |        |                |                      |
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 18mm | ESFERA | Diámetro medio | Error de Forma medio |
|                          | SPH 1  | 17,9592        | 0,0294               |
|                          | SPH 2  | 17,9555        | 0,029                |
|                          | SPH 3  | 17,9560        | 0,0354               |
|                          | SPH 4  | 17,9678        | 0,0276               |
|                          | SPH 5  | 17,9617        | 0,0277               |
|                          | SPH 6  | 17,9407        | 0,0223               |
|                          | SPH 7  | 17,9393        | 0,0229               |
|                          | SPH 8  | 17,9740        | 0,029                |
|                          | SPH 9  | 17,9518        | 0,0262               |
|                          | SPH 10 | 17,9478        | 0,0264               |
| CMM (POST-ÁCIDO)         |        |                |                      |
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 25mm | ESFERA | Diámetro medio | Error de Forma medio |
|                          | SPH 1  | 24,9309        | 0,0195               |
|                          | SPH 2  | 24,9145        | 0,0144               |
|                          | SPH 3  | 24,9359        | 0,0266               |
|                          | SPH 4  | 24,9257        | 0,0106               |
|                          | SPH 5  | 24,9254        | 0,0194               |
|                          | SPH 6  | 24,9264        | 0,016                |
|                          | SPH 7  | 24,9378        | 0,0226               |
|                          | SPH 8  | 24,9341        | 0,0141               |
|                          | SPH 9  | 24,9334        | 0,0231               |
|                          | SPH 10 | 24,9294        | 0,0235               |

#### 1.4.5.2. Medición sin contacto

En cuanto a la medición sin contacto (Figura 37), se decidió escanear esta vez tanto en ganancia normal (Figura 38) como en ganancia alta para poder analizar de manera más detallada el efecto que tiene el tratamiento químico sobre la superficie de las esferas, en referencia al número de puntos captados. Los demás parámetros de escaneo fueron iguales al caso de la medición pre-ácido, es decir, densidad de puntos de 16,8 pto/mm y anchura de 123 mm.



*Figura 37. Medición sin contacto de las esferas post-ácido*



Figura 38. Configuración para el escaneo con ganancia normal

De nuevo se procedió a obtener los diámetros, errores de forma, desviaciones estándar y número de puntos de las nubes de puntos de cada una de las mediciones de los diferentes tamaños de las esferas, ahora tratadas químicamente. Se realizaron 3 mediciones, en ganancia normal, de cada uno de los tamaños y después otras 3 mediciones en ganancia alta. Después de recoger los valores de cada medición del mismo tamaño se ha realizado un cómputo de los valores medios (Tabla 10 y Tabla 11).

*Tabla 10. Compuo de las medidas de las esferas con HP-L-10.6® en Ganancia Normal (Post-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
|--|--------|----------|----------------|--------------|-------------|---------|--------|
| COMPUTO<br>DIAMETRO 10mm               | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|  | SPH 1  | 9,8965   | 0,1065         | 0,0231       | 13.496      | -0,0529 | 0,0574 |
|  | SPH 2  | 9,8838   | 0,1377         | 0,0284       | 21.027      | -0,0632 | 0,0826 |
|  | SPH 3  | 9,8702   | 0,1018         | 0,0219       | 13.556      | -0,0506 | 0,0554 |
|  | SPH 4  | 9,9000   | 0,1016         | 0,0215       | 13.606      | -0,0496 | 0,0565 |
|  | SPH 5  | 9,8853   | 0,0999         | 0,0219       | 13.908      | -0,0493 | 0,0544 |
|  | SPH 6  | 9,8508   | 0,1065         | 0,0222       | 13.576      | -0,0514 | 0,0560 |
|  | SPH 7  | 9,8321   | 0,1069         | 0,0220       | 13.275      | -0,0533 | 0,0572 |
|  | SPH 8  | 9,8936   | 0,1336         | 0,0259       | 14.108      | -0,0603 | 0,0822 |
|  | SPH 9  | 9,8588   | 0,1184         | 0,0263       | 20.313      | -0,0581 | 0,0629 |
|  | SPH 10 | 9,8502   | 0,1107         | 0,0233       | 13.431      | -0,0540 | 0,0600 |
| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
| COMPUTO<br>DIAMETRO 18mm               | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|  | SPH 1  | 17,8063  | 0,1393         | 0,0296       | 46.388      | -0,0695 | 0,0694 |
|  | SPH 2  | 17,7992  | 0,1370         | 0,0290       | 45.146      | -0,0684 | 0,0684 |
|  | SPH 3  | 17,7732  | 0,1319         | 0,0271       | 50.668      | -0,0655 | 0,0659 |
|  | SPH 4  | 17,8083  | 0,1374         | 0,0296       | 41.749      | -0,0686 | 0,0682 |
|  | SPH 5  | 17,7962  | 0,1407         | 0,0281       | 45.854      | -0,0663 | 0,0680 |
|  | SPH 6  | 17,7854  | 0,1405         | 0,0311       | 41.900      | -0,0741 | 0,0745 |
|  | SPH 7  | 17,7749  | 0,1379         | 0,0428       | 41.510      | -0,0689 | 0,0687 |
|  | SPH 8  | 17,8062  | 0,1398         | 0,0294       | 48.213      | -0,0699 | 0,0693 |
|  | SPH 9  | 17,7932  | 0,1419         | 0,0301       | 45.003      | -0,0709 | 0,0707 |
|  | SPH 10 | 17,7740  | 0,1390         | 0,0293       | 49.965      | -0,0694 | 0,0693 |
| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
| COMPUTO<br>DIAMETRO 25mm               | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|  | SPH 1  | 24,8585  | 0,0887         | 0,0194       | 84.979      | -0,0443 | 0,0490 |
|  | SPH 2  | 24,8538  | 0,0825         | 0,0177       | 84.788      | -0,0412 | 0,0450 |
|  | SPH 3  | 24,8609  | 0,0861         | 0,0185       | 87.562      | -0,0431 | 0,0458 |
|  | SPH 4  | 24,8596  | 0,0850         | 0,0183       | 84.873      | -0,0425 | 0,0473 |
|  | SPH 5  | 24,8472  | 0,0875         | 0,0183       | 88.531      | -0,0430 | 0,0491 |
|  | SPH 6  | 24,8493  | 0,0875         | 0,0192       | 85.567      | -0,0445 | 0,0465 |
|  | SPH 7  | 24,8572  | 0,0841         | 0,0182       | 85.017      | -0,0421 | 0,0476 |
|  | SPH 8  | 24,8630  | 0,0880         | 0,0191       | 84.608      | -0,0440 | 0,0494 |
|  | SPH 9  | 24,8498  | 0,0803         | 0,0174       | 84.740      | -0,0401 | 0,0460 |
|  | SPH 10 | 24,8588  | 0,0861         | 0,0186       | 87.542      | -0,0431 | 0,0477 |



*Tabla 11. Compuo de las medidas de las esferas con HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Post-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
|--------------------------------------|--------|----------|----------------|--------------|-------------|---------|--------|
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 10mm             | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|                                      | SPH 1  | 9,9244   | 0,1015         | 0,0219       | 13.397      | -0,0506 | 0,0509 |
|                                      | SPH 2  | 9,9136   | 0,1272         | 0,0270       | 20.871      | -0,0627 | 0,0667 |
|                                      | SPH 3  | 9,9014   | 0,0979         | 0,0214       | 13.448      | -0,0486 | 0,0494 |
|                                      | SPH 4  | 9,9307   | 0,0971         | 0,0201       | 13.425      | -0,0482 | 0,0491 |
|                                      | SPH 5  | 9,9135   | 0,0935         | 0,0200       | 13.379      | -0,0460 | 0,0471 |
|                                      | SPH 6  | 9,8782   | 0,0974         | 0,0200       | 13.154      | -0,0483 | 0,0490 |
|                                      | SPH 7  | 9,8627   | 0,1011         | 0,0210       | 13.159      | -0,0495 | 0,0518 |
|                                      | SPH 8  | 9,9181   | 0,1109         | 0,0232       | 13.682      | -0,0521 | 0,0595 |
|                                      | SPH 9  | 9,8912   | 0,1152         | 0,0256       | 20.194      | -0,0573 | 0,0575 |
|                                      | SPH 10 | 9,8798   | 0,1084         | 0,0226       | 13.227      | -0,0538 | 0,0548 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 18mm             | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|                                      | SPH 1  | 17,9386  | 0,0961         | 0,0211       | 52.738      | -0,0480 | 0,0478 |
|                                      | SPH 2  | 17,9254  | 0,0849         | 0,0181       | 45.776      | -0,0424 | 0,0426 |
|                                      | SPH 3  | 17,9038  | 0,0845         | 0,0175       | 46.353      | -0,0422 | 0,0423 |
|                                      | SPH 4  | 17,9465  | 0,0852         | 0,0187       | 42.418      | -0,0426 | 0,0423 |
|                                      | SPH 5  | 17,9368  | 0,0865         | 0,0188       | 42.231      | -0,0433 | 0,0430 |
|                                      | SPH 6  | 17,9239  | 0,0918         | 0,0205       | 44.253      | -0,0459 | 0,0457 |
|                                      | SPH 7  | 17,9160  | 0,0849         | 0,0185       | 42.190      | -0,0425 | 0,0425 |
|                                      | SPH 8  | 17,9370  | 0,0949         | 0,0211       | 52.363      | -0,0475 | 0,0473 |
|                                      | SPH 9  | 17,9194  | 0,0896         | 0,0193       | 45.772      | -0,0448 | 0,0449 |
|                                      | SPH 10 | 17,9076  | 0,0922         | 0,0202       | 47.772      | -0,0461 | 0,0461 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |        |          |                |              |             |         |        |
| COMPUTO<br>DIÁMETRO 25mm             | ESFERA | DIÁMETRO | ERROR de FORMA | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS | MIN     | MAX    |
|                                      | SPH 1  | 24,8761  | 0,0921         | 0,0196       | 85.330      | -0,0459 | 0,0461 |
|                                      | SPH 2  | 24,8620  | 0,0860         | 0,0172       | 83.775      | -0,0429 | 0,0430 |
|                                      | SPH 3  | 24,8864  | 0,0929         | 0,0196       | 85.883      | -0,0464 | 0,0466 |
|                                      | SPH 4  | 24,8728  | 0,0885         | 0,0182       | 83.953      | -0,0442 | 0,0444 |
|                                      | SPH 5  | 24,8692  | 0,0927         | 0,0197       | 85.754      | -0,0463 | 0,0464 |
|                                      | SPH 6  | 24,8706  | 0,0932         | 0,0197       | 88.974      | -0,0466 | 0,0466 |
|                                      | SPH 7  | 24,8828  | 0,0923         | 0,0188       | 84.020      | -0,0461 | 0,0463 |
|                                      | SPH 8  | 24,8828  | 0,0943         | 0,0202       | 87.596      | -0,0471 | 0,0473 |
|                                      | SPH 9  | 24,8810  | 0,0888         | 0,0183       | 84.041      | -0,0444 | 0,0444 |
|                                      | SPH 10 | 24,8832  | 0,0929         | 0,0195       | 84.590      | -0,0464 | 0,0465 |

### 1.4.6. Análisis y comparativa resultados

Habiendo completado todas las mediciones, tanto por contacto como sin contacto, sobre las esferas originales y sobre ellas mismas una vez se realizó el tratamiento químico, se ha llevado a cabo el análisis de los resultados. Los datos obtenidos han permitido comparar los parámetros principales del estudio: diámetro, error de forma de las esferas, el número de puntos obtenidos y la desviación estándar; tanto para las esferas originales como para las tratadas químicamente.

En cuanto a los valores de diámetro (Tabla 12), en las esferas tratadas se han observado diferencias entre las medidas por contacto y sin contacto sustancialmente mayores que en las esferas originales (sin tratar). Mientras que, inicialmente las diferencias encontradas rondaban el orden de la décima esta diferencia se reducía, en las esferas tratadas químicamente, hasta el

orden de las 48  $\mu\text{m}$  para el  $\varnothing 10$  mm, de 30  $\mu\text{m}$  para el  $\varnothing 18$  mm y de 53  $\mu\text{m}$  para el  $\varnothing 25$  mm, en el modo de ganancia alta.

Tabla 12. Comparación de la medición por contacto y sin contacto del diámetro antes y después del tratamiento químico

| Diámetro [mm]         |                |                |            |                |                |            |                |            |
|-----------------------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|------------|----------------|------------|
| Ácido                 | Pre            |                |            | Post           |                |            |                |            |
| Medición              | CMM            | Sensor Láser   |            | CMM            | Sensor Láser   |            |                |            |
| Ganancia              |                | Alta           |            |                | Alta           |            | Normal         |            |
| Diámetro Esferas [mm] | Diámetro Medio | Diámetro Medio | Diferencia | Diámetro Medio | Diámetro Medio | Diferencia | Diámetro Medio | Diferencia |
| 10                    | 10,0018        | 9,9629         | -0,0389    | 9,9492         | 9,9014         | -0,0478    | 9,8721         | -0,0770    |
| 18                    | 18,0065        | 17,8884        | -0,1181    | 17,9554        | 17,9255        | -0,0299    | 17,7917        | -0,1637    |
| 25                    | 25,0080        | 24,8468        | -0,1611    | 24,9293        | 24,8767        | -0,0527    | 24,8558        | -0,0735    |

Cualitativamente se observaron resultados similares en los datos correspondientes al error de forma de las entidades. Las diferencias entre las medidas por contacto y las medidas sin contacto seguían siendo más elevadas antes que después del tratamiento. En este caso, las diferencias postratamiento en ganancia alta alcanzaban un valor medio de 71  $\mu\text{m}$  entre los tres diámetros y, sin embargo, el error de forma antes del tratamiento alcanza una desviación del entorno de las cinco décimas entre las medidas por contacto y sin contacto en las esferas de  $\varnothing 10$  mm.

Tabla 13. Comparación de la medición por contacto y sin contacto del Error de Forma antes y después del tratamiento químico

| Error de Forma        |                      |                      |            |                      |                      |            |                      |            |
|-----------------------|----------------------|----------------------|------------|----------------------|----------------------|------------|----------------------|------------|
| Ácido                 | Pre                  |                      |            | Post                 |                      |            |                      |            |
| Medición              | CMM                  | Sensor Láser         |            | CMM                  | Sensor Láser         |            |                      |            |
| Ganancia              |                      | Alta                 |            |                      | Alta                 |            | Normal               |            |
| Diámetro Esferas [mm] | Error de Forma Medio | Error de Forma Medio | Diferencia | Error de Forma Medio | Error de Forma Medio | Diferencia | Error de Forma Medio | Diferencia |
| 10                    | 0,0022               | 0,4917               | 0,4895     | 0,0247               | 0,1053               | 0,0805     | 0,1167               | 0,0631     |
| 18                    | 0,0021               | 0,1446               | 0,1426     | 0,0276               | 0,0890               | 0,0614     | 0,1384               | 0,0940     |
| 25                    | 0,0049               | 0,1476               | 0,1427     | 0,0190               | 0,0914               | 0,0724     | 0,0901               | 0,0444     |

En la Tabla 14 se muestran los diámetros obtenidos con la CMM en mediciones por contacto una vez realizado el tratamiento superficial, así como las diferencias respecto de los valores de las esferas en su estado original.

*Tabla 14. Diferencia de la medición del Diámetro por contacto de las esferas antes y después del tratamiento.*

| <b>Medición por contacto</b> |                 |             |                   |
|------------------------------|-----------------|-------------|-------------------|
| <b>Diámetro Esferas [mm]</b> | <b>Diámetro</b> |             |                   |
|                              | <b>Pre</b>      | <b>Post</b> | <b>Diferencia</b> |
| <b>10</b>                    | 10,0018         | 9,9492      | -0,0526           |
| <b>18</b>                    | 18,0065         | 17,9554     | -0,0511           |
| <b>25</b>                    | 25,0080         | 24,9293     | -0,0786           |

En el mismo sentido, se muestran en la Tabla 15 los valores correspondientes al error de forma encontrando. En este caso las desviaciones alcanzan un valor máximo de 25 µm en las esferas de Ø18 mm cuando se les ha sometido al baño químico en agua regia.

*Tabla 15. Diferencia de la medición del Error de Forma por contacto antes y después del tratamiento.*

| <b>Medición por contacto</b> |                       |             |                   |
|------------------------------|-----------------------|-------------|-------------------|
| <b>Diámetro Esferas [mm]</b> | <b>Error de Forma</b> |             |                   |
|                              | <b>Pre</b>            | <b>Post</b> | <b>Diferencia</b> |
| <b>10</b>                    | 0,0022                | 0,0247      | 0,0225            |
| <b>18</b>                    | 0,0021                | 0,0276      | 0,0255            |
| <b>25</b>                    | 0,0049                | 0,0190      | 0,0141            |

Si atendemos a la nube de puntos generada por el sensor láser de triangulación, se confirma la mejoría obtenida en la calidad y cantidad de puntos capturados respecto de las esferas sin tratar, al eliminarse los reflejos producidos por las superficies brillantes. El parámetro que mejor caracteriza la calidad de la nube de puntos es la desviación estándar. Los valores obtenidos se representan en la Tabla 16. En este sentido una desviación estándar baja significaría una mayor calidad, ya que los datos de las nubes obtenidos de las esferas tenderían a estar agrupados alrededor de la media. De hecho, se considera un adecuado sustituto del error de forma si lo que se pretende es medir la calidad de la nube de puntos cuando el ajuste se realiza a una esfera perfecta.

*Tabla 16. Desviación Estándar de la nube de puntos*

| <b>Desviación Estándar de la Nube de Puntos</b> |                     |                     |                     |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| Ácido   | Pre                 | Post                |                     |
| Medición  | Sensor Láser        | Sensor Láser        |                     |
| Ganancia  | Alta                | Alta                | Normal              |
| Diámetro Esferas [mm]                           | Desviación Estandar | Desviación Estandar | Desviación Estandar |
| 10  | 0,0397              | 0,0223              | 0,0236              |
| 18  | 0,0294              | 0,0194              | 0,0306              |
| 25  | 0,0312              | 0,0191              | 0,0185              |

También se ha recogido en la Tabla 17 la mejora de la desviación estándar de la nube de puntos después del tratamiento químico en ganancia alta y normal, frente a los valores de la desviación estándar obtenidos en ganancia alta pre-ácido.

*Tabla 17. Mejora de la desviación estándar de la nube de puntos después del tratamiento químico*

| <b>Mejora de la Desviación Estándar de la Nube de Puntos Post</b> |         |          |          |
|---|---------|----------|----------|
| Alta  | Normal  | Alta     | Normal   |
| Mejora  | Mejora  | % Mejora | % Mejora |
| 0,0174  | 0,0160  | 43,81    | 40,41    |
| 0,0101  | -0,0012 | 34,16    | -4,00    |
| 0,0121  | 0,0127  | 38,82    | 40,76    |

Con la intención de clarificar los resultados gráficamente, se presenta la Figura 39, en la cual se recogen los valores de la desviación estándar de cada una de las 10 esferas que conforman los 3 conjuntos analizados en la experimentación. En líneas de trazos se representan los valores correspondientes a los tres diámetros de las esferas en su estado original previo al tratamiento. En líneas continuas aparecen los valores representativos de los tres diámetros correspondientes

a las esferas tratadas químicamente. El gráfico muestra claramente cómo tras el tratamiento químico de las esferas los valores de la desviación estándar han disminuido.

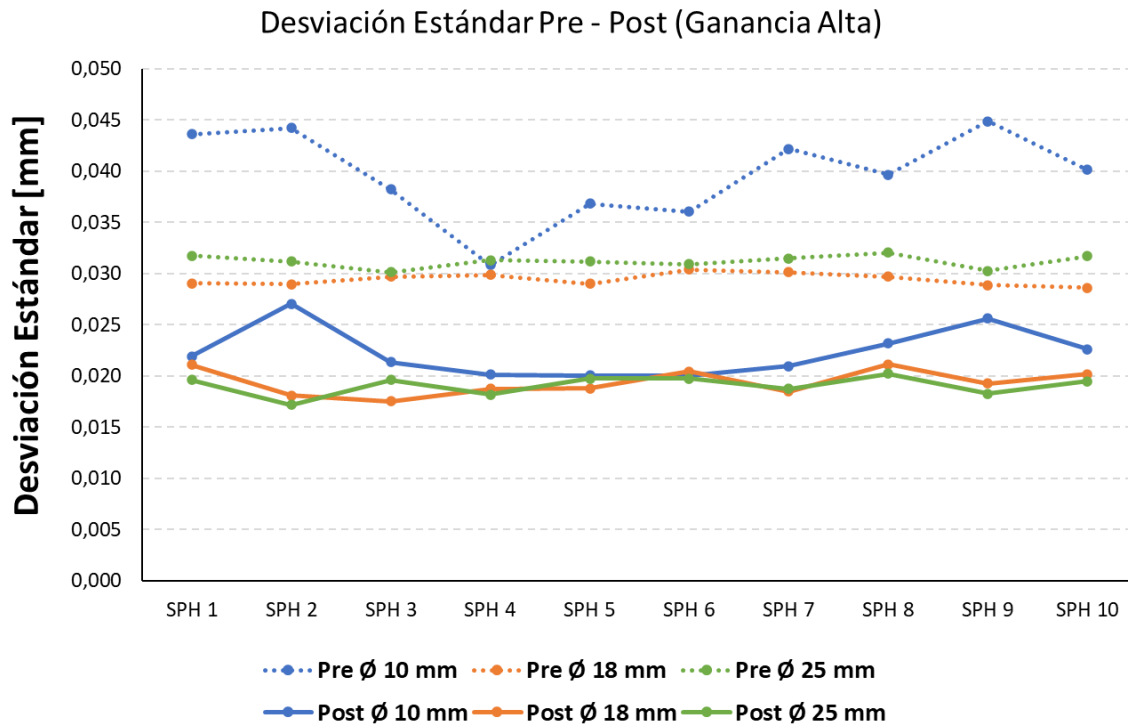


Figura 39. Desviación Estándar pre y post-ácido en Ganancia Alta

Por otra parte, en la Tabla 18 se muestran las cantidades de puntos recogidas antes y después del baño químico. Se detecta un mayor incremento en las esferas del diámetro más pequeño (10 mm), esto es debido a la relación entre la densidad de la línea del láser con respecto al diámetro de las esferas. No obstante, en los tres casos el incremento del número de puntos capturado es significativo.

*Tabla 18. Número de puntos obtenidos antes y después del tratamiento*

| <b>Número de Puntos</b>      |                     |                     |                  |
|------------------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| <b>Ácido</b>                 | <b>Pre</b>          | <b>Post</b>         |                  |
| <b>Medición</b>              | <b>Sensor Láser</b> | <b>Sensor Láser</b> |                  |
| <b>Ganancia</b>              | <b>Alta</b>         | <b>Alta</b>         | <b>Normal</b>    |
| <b>Diámetro Esferas [mm]</b> | <b>Nº Puntos</b>    | <b>Nº Puntos</b>    | <b>Nº Puntos</b> |
| <b>10</b>                    | 6967                | 14793               | 15030            |
| <b>18</b>                    | 40120               | 46187               | 45640            |
| <b>25</b>                    | 64862               | 85392               | 85821            |

En la Tabla 19 se observa la diferencia entre el número de puntos obtenidos, en ganancia alta, entre la medición post-ácido y la medición pre-ácido, así como también la mejora porcentual que se obtiene tras aplicar el tratamiento. Con el equipo láser disponible, se ha podido contrastar la mejora en la densidad y en la cobertura de la nube de puntos. Esta mejora era evidente, ya que la cobertura con esferas originales era muy pobre. De hecho, en algunos casos (esferas de Ø10 mm), no se pudieron reconstruir correctamente todas las esferas ya que presentaban defectos significativos en la superficie de sus nubes de puntos (Figura 40). En consecuencia, la

comparación entre el pre y post baño químico sólo fue posible en todas las esferas cuando se utilizó una ganancia alta (sensibilidad baja del sensor láser).

Tabla 19. Mejora en el Número de puntos captados post-ácido en ganancia alta

| Mejora del Número de Puntos Post |               |
|----------------------------------|---------------|
| Alta                             | Alta          |
| Diferencia Post-Pre              | % Mejora Post |
| 7826                             | 52,90         |
| 6066                             | 13,14         |
| 20529                            | 24,04         |

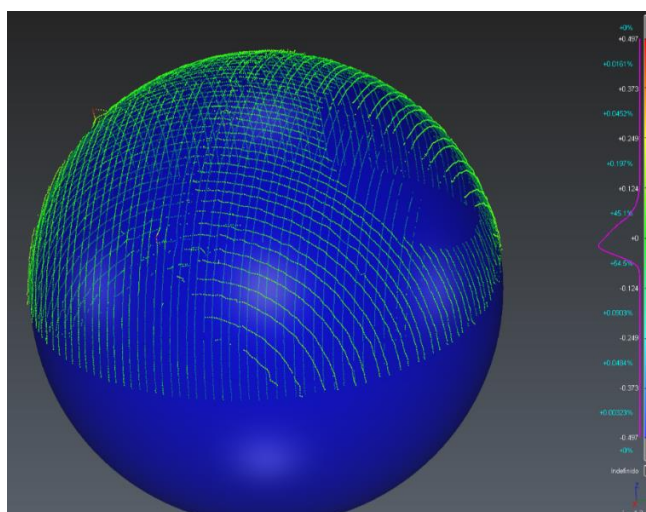
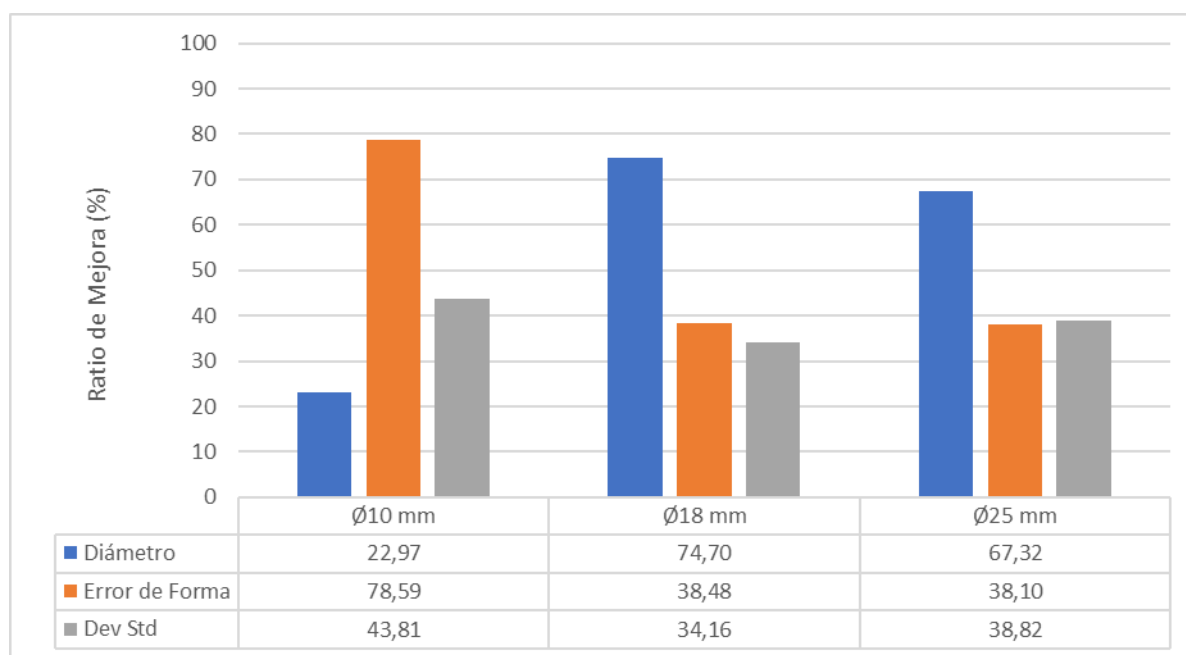


Figura 40. Defectos en la reconstrucción de las esferas

Una segunda mejora conseguida está relacionada con la aproximación dimensional de las mediciones del láser a las mediciones de la CMM (referencia). Entendiendo por mejora la relación (%) entre el parámetro medido por láser respecto al parámetro medido por contacto. Es decir, una mejora del 100% en cualquiera de las medidas significaría que el láser obtiene la misma medida que la CMM por contacto.

Si atendemos a los parámetros evaluados en la experimentación mediante baño químico, podemos observar que también se consiguen unas mejoras porcentuales de los valores obtenidos tras este tratamiento superficial por inmersión en agua regia. Estas mejoras son sustanciales, aunque no homogéneas, en todo el rango de diámetros (Figura 41).

Las ratios de mejora de los parámetros son relativamente pequeños en el caso del error de forma y la desviación estándar para las esferas de Ø18 mm y Ø25 mm, encontrando unas mejoras entre el 30% y el 40% y para los valores del diámetro, las mejoras son inferiores al 75% en esas mismas medidas.



*Figura 41. Relación de mejora en la medida sin contacto para los tres parámetro estudiados considerados tras el proceso de baño químico*



## 1.5. CONCLUSIONES

Durante el transcurso de este trabajo de investigación se ha generado una abundante cantidad de datos e información con el objetivo de facilitar el juicio y la valoración de la experimentación realizada. Además, este estudio aporta una alta fiabilidad en la repetibilidad del proceso empleado dado el elevado número de esferas y ensayos llevados a cabo, tanto en las mediciones por contacto con la CMM como en las mediciones sin contacto realizadas con el sensor láser de triangulación.

En primer lugar, comparando los valores obtenidos en las mediciones por contacto, antes y después del baño químico, se hace evidente que el tratamiento químico origina una reducción de los diámetros, en los tres tamaños de esferas, en un valor medio de 0,061 mm.

Por otro lado, las diferencias entre los valores de los diámetros medidos por contacto y sin contacto, en ganancia alta, después del tratamiento superficial, oscilan en torno a los 0,043 mm de media (-0,0478 en Ø10 mm, -0,0299 en Ø18 mm, -0,0527 en Ø25 mm), valor que supera las precisiones estimadas en los equipos de calibración óptica (0,025 mm a 0,040 mm). De igual forma se observa que, una vez tratadas las esferas, las diferencias en los valores del error de forma obtenidos por contacto y sin contacto oscilan en torno a los 0,071 mm, valor que también está sustancialmente por encima de las mencionadas precisiones.

Adicionalmente, el estudio confirma las mejoras obtenidas en cuanto a la cantidad de puntos obtenidos en los tres diámetros mediante el sensor láser después del baño químico. Estas mejoras son ostensiblemente más significativas en las esferas de menor diámetro (52,9% tras el tratamiento químico).

Por último, si atendemos a la desviación estándar de la nube de puntos obtenida antes y después del tratamiento superficial, el estudio recoge una reducción de los valores de la desviación estándar en las esferas una vez procesadas. Lo cual indicaría que además de captar una mayor cantidad de puntos, como se había planteado anteriormente, la calidad de la nube de puntos obtenida tras el tratamiento químico también presenta una mejoría frente a la de las esferas sin tratar.

Una vez finalizado el proyecto y valorando los resultados obtenidos se puede determinar que el tratamiento químico es capaz de eliminar los brillos y facilita la captura de puntos, consiguiendo

así una mejora en cuanto a la trazabilidad dimensional. Pero se ha de tener en cuenta que, según los parámetros concretos utilizados para este proyecto, estas esferas tratadas químicamente han presentado un error de forma demasiado elevado, según la normativa y los estándares seleccionados, invalidando este proceso para obtener esferas como elementos de referencia, aun cumpliendo con la característica buscada de ofrecer una captura de nube de puntos de alta calidad y número suficiente de puntos en el escaneo láser.

Cabe señalar que cuanto mayor sea el tiempo de inmersión de las esferas, más agresivo será el efecto del baño químico sobre el acero inoxidable. De hecho, se ha observado en la experimentación que tras los 8 minutos de exposición química es necesario realizar una limpieza posterior de las esferas y que el proceso de secado al aire ha producido surcos lineales diametrales, posiblemente producidas por efecto de la gravedad, que ha afectado significativamente al acabado superficial de las esferas.

De esta forma se alcanza el objetivo principal del proyecto que consistía en identificar la validez y el grado de idoneidad de un tratamiento químico de bajo coste sobre esferas de acero inoxidable para su uso como elementos de referencia en aplicaciones de metrología sin contacto e ingeniería inversa. Además de esto, como resultado del trabajo de investigación, se han logrado también una serie de objetivos parciales. Primero, se ha establecido efectivamente una metodología del proceso de investigación. Después se ha estudiado la influencia de la aplicación de filtros de sensores ópticos sobre las nubes de puntos y se ha elegido acordemente el filtro que ofrece la mayor calidad de captura, según las características y necesidades de esta investigación. Además, se han determinado los parámetros del tratamiento superficial (orientaciones, tiempos de exposición, niveles de concentración de la solución) y una vez realizado el baño químico, se ha estudiado el efecto que ha tenido este tratamiento sobre las esferas, más concretamente sobre los parámetros de referencia (error de forma, diámetro, número de puntos obtenidos y desviación estándar de la nube de puntos sobre la esfera de mejor ajuste). Dado que este estudio se ha realizado para esferas de distintos tamaños, también se ha podido analizar la influencia de la variación del diámetro con relación a los parámetros de referencia utilizados en la investigación.

Como último apunte es importante destacar que el control del tiempo total de exposición, la forma de ataque e incluso la disposición de las esferas durante el proceso de secado podrían

resultar determinantes a la hora de obtener mejores resultados. Esta información podría, sin duda, servir de base para la realización de futuras investigaciones y proyectos.

## 1.6. TRABAJOS FUTUROS

A medida que se iba desarrollando el proyecto de investigación han ido surgiendo distintas ideas paralelas a este, debido a la multitud de factores influyentes en los experimentos y pruebas realizadas. Entre estas variantes se podría concebir un nuevo estudio centrado en la variación del tiempo de aplicación del tratamiento químico. En este nuevo proyecto se someterían los conjuntos (pletina-esferas) a diferentes tiempos de inmersión para determinar el tiempo óptimo en el que se maximiza el número de puntos obtenidos, a través de un sistema de medición con un láser de triangulación, y se minimiza el error de forma causado por la reacción del ácido.

También serían posibles otras variaciones del experimento:

- Utilizar diferentes niveles de concentración de agua regia sobre las esferas de acero inoxidable para intentar minimizar en cierta medida la acción corrosiva del ácido y evitar así el error de forma tan pronunciado que se ha producido, pero la suficiente como para eliminar los brillos superficiales y obtener una superficie mate.
- Utilizar otros ácidos menos abrasivos sobre esferas de acero inoxidable
- Utilizar esferas de diversos materiales metálicos o cerámicos de bajo coste para comprobar el efecto que tiene el ácido sobre estos, con relación a la trazabilidad geométrica que se obtiene de ellos, pero evitando alterar significativamente los parámetros estudiados.

## 1.7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. M. K. Vacharanukul, «In-process dimensional inspection sensors, Measurement, 38 (2005) 204–218,» [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2005.07.009>.
- [2] I. 3290-1:2014, «Rolling bearings Balls Part 1: Steel balls (DIN 5401 : 2002-08)».
- [3] Carbone, «Ficha Técnica Del Acero Inoxidable AISI SERIE 300,» [En línea]. Available: <https://www.empresascarbone.com/pdf/ficha-tecnica-del-acero-inoxidable.pdf>.
- [4] V. G. N., C. S., B. P. y K. J.-P., «A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs. Opt. Lasers Eng. 2009, 47(3-4), 336-342.,» [En línea]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.06.001> .
- [5] J.-A. Beraldin, D. Mackinnon y L. Cournoyer, «Metrological characterization of 3D imaging systems: Progress report on standards developments. In Proceedings of the 17th International Congress of Metrology, Paris, France, 21–24 September 2015; p. 13003.».
- [6] A. Satyanarayana, M. Krishna, A. Chandrakanth y R. Pradyumna, « Influence of LASER CMM Process Parameters on Dimensional Inspection of Standard Spheres. Mater. Today Proc. 2018, 5, 3965–3970.».
- [7] Y. Wang y H.-Y. Feng, «Effects of scanning orientation on outlier formation in 3D laser scanning of reflective surfaces. Opt. Lasers Eng. 2016, 81, 35–45.».
- [8] V. Meana, E. Cuesta y B. Álvarez, «Testing the Sandblasting Process in the Manufacturing of Reference Spheres for Non-Contact Metrology Applications. Materials 2021, 14, 5187.,» [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/ma14185187>.

- [9] C. E. d. M. e. I. d. l. I. d. España, «La Metrología también existe,» Diciembre 2019 .  
[En línea]. Available:  
[https://www.cem.es/sites/default/files/30363\\_lametrologiatambienexiste\\_web.pdf](https://www.cem.es/sites/default/files/30363_lametrologiatambienexiste_web.pdf).
- [10] J. Á. R. C. M<sup>a</sup> Peñahora Cañeque Simón, «La Metrología en España,» [En línea].  
Available:  
<https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/407/NOTAS.pdf>.
- [11] M. D. D. C. M. José Ángel Robles Carbonell, «La Metrología, motor de innovación tecnológica y desarrollo industrial.,» (CEM).
- [12] E. & F. P. & R. C. & Á. B. & F. D. Cuesta, «Aplicaciones Metrologicas de los láseres por triangulacion (DM-284 2005) original.,» (2014).
- [13] E. F. P. Á. B. J. & B. D. Cuesta, «Influencia del Acabado Superficial en el Digitalizado con Sensores de Triangulación por Láser.,» (2008). [En línea].  
Available: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642008000300015>.
- [14] IPFResearch, «Coordinate Measuring Machine,» [En línea]. Available:  
<http://www.ipfresearch.com/equipment/coordinate-measuring-machine-dea-global-image-091508>.
- [15] AENOR, «Especificación geométrica de productos (GPS). Ensayos de aceptación y de verificación periódica de máquinas de medición por coordenadas (MMC). Parte 2: MMC utilizadas para la medición de dimensiones lineales. (ISO 10360-2:2009)».
- [16] Renishaw, «Cabezal Renishaw SP25,» [En línea]. Available:  
<https://www.renishaw.es/es/sp25m--6688>.
- [17] Hexagon, «PC-DMIS 2018 R2,» [En línea]. Available:  
<https://www.hexagonmi.com/es-es/products/software/pc-dmis/pc-dmis-2018-r2>.
- [18] Hexagon, «Product Brochure HP-L-10.6 HP-L-20.8 Laser Scanner For Coordinate Measuring Machines,» [En línea]. Available:

<https://hobbydocbox.com/Photography/99418948-Product-brochure-hp-1-10-6-hp-1-20-8-laser-scanner-for-coordinate-measuring-machines.html#>.

- [19] 3DSystems, «Geomagic Control X SOFTWARE DE INSPECCIÓN Y METROLOGÍA 3D,» [En línea]. Available: <https://es.3dsystems.com/software/geomagic-control-x>.



## **2. PRESUPUESTO**

## 2.1. COSTES DE EJECUCIÓN MATERIAL

El coste de ejecución material incluye cuatro categorías: coste de material (Tabla 20), coste de mano de obra (Tabla 21), coste de ingeniería (Tabla 22) y la amortización de los equipos utilizados en el proyecto (Tabla 23). El coste total de ejecución material (Tabla 24) será la suma de estos.

### 2.1.1. Coste de material

*Tabla 20. Coste de material*

| MATERIAL                          | CANTIDAD | PRECIO  |
|-----------------------------------|----------|---------|
| Placa base                        | 3 ud.    | 57,09 € |
| Esferas de rodamiento             | 30 ud.   | 28,20 € |
| Tornillo Allen M5 x 8 - ISO 4762  | 10 ud.   | 4,10 €  |
| Tornillo Allen M6 x 10 - ISO 4762 | 10 ud.   | 4,10 €  |
| Tornillo Allen M6 x 16 - ISO 4762 | 10 ud.   | 4,10 €  |
| Bote HCl                          | 1 ud.    | 9,59 €  |
| Bote HNO <sub>3</sub>             | 1 ud.    | 26,15 € |
| Bote Fe <sub>3</sub> Cl           | 1 ud.    | 14,98 € |
| Tornillo espaciador               | 12 ud.   | 4,92 €  |
| Bandeja de manipulación           | 1 ud.    | 17,32 € |
| Material de laboratorio otros     | 1 ud.    | 37,68 € |

**Subtotal: ..... 208,23 €**

### 2.1.2. Coste de mano de obra

El coste unitario de la mano de obra será de 20 €/h.

*Tabla 21. Coste de mano de obra*

| CONCEPTO                     | CANTIDAD | SUBTOTAL |
|------------------------------|----------|----------|
| Arenado de las placas base   | 2 horas  | 40,00 €  |
| Taladrado de las placas base | 3 horas  | 60,00 €  |
| Taladrado de las esferas     | 2 horas  | 40,00 €  |
| Tratamiento químico          | 4 horas  | 80,00 €  |

**Subtotal: ..... 220,00 €**

### 2.1.3. Coste de ingeniería

El coste de ingeniería que se ha estimado es de 140 €/día. La dedicación será de 5 días a la semana, 7 horas diarias, a 20 €/h.

*Tabla 22. Coste de ingeniería*

| CONCEPTO                                    | CANTIDAD | SUBTOTAL   |
|---|----------|------------|
| Estudios previos                            | 12 días  | 1.680,00 € |
| Definición de la metodología                | 3 días   | 420,00 €   |
| Diseño de los conjuntos                     | 5 días   | 700,00 €   |
| Medición de conjuntos originales y tratados | 25 días  | 3.500,00 € |
| Obtención de resultados                     | 11 días  | 1.540,00 € |
| Análisis de datos                           | 21 días  | 2.940,00 € |
| Memoria del proyecto                        | 34 días  | 4.760,00 € |

**Subtotal: ..... 111 días ..... 15.540,00 €**

La realización del proyecto ha requerido 111 días laborables (de ingeniería), repartidos en un período de 8 meses.

### 2.1.4. Amortización de equipos

*Tabla 23. Amortización de equipos*

| EQUIPO           | COSTE/MES | TIEMPO UTILIZADO | SUBTOTAL   |
|------------------|-----------|------------------|------------|
| CMM              | 111,11 €  | 25 días          | 2.777,75 € |
| Sonda de palpado | 1,67 €    | 11 días          | 18,37 €    |
| Sensor láser     | 6,67 €    | 14 días          | 93,38 €    |

**Subtotal: ..... 2.889,50 €**

### 2.1.5. Coste total de ejecución material

*Tabla 24. Coste total de ejecución material.*

| CONCEPTO                | SUBTOTAL    |
|-------------------------|-------------|
| Coste de material       | 208,22 €    |
| Coste de mano de obra   | 220,00 €    |
| Coste de ingeniería     | 15.540,00 € |
| Amortización de equipos | 2.889,50 €  |

**Subtotal: ..... 18.857,72 €**

## 2.2. GASTOS GENERALES

Los gastos generales (Tabla 25) son los gastos obligados que se derivan de la utilización de las instalaciones: coste energético de la CMM, ventilación, calefacción, luz, etc. Se estima un porcentaje del 3% sobre el coste de ejecución material.

*Tabla 25. Gastos generales.*

| CONCEPTO         | SUBTOTAL |
|------------------|----------|
| Gastos generales | 565,73 € |

**Subtotal: ..... 565,73 €**

### 2.3. IMPORTE TOTAL

El importe total del presupuesto del proyecto (Tabla 26) será la suma del coste total de la ejecución material más los gastos generales. No se han añadido ni beneficio industrial ni IVA al presupuesto, ya que este proyecto es considerado puramente de investigación y no es un servicio que se vaya a vender.

Tabla 26. Importe total del presupuesto

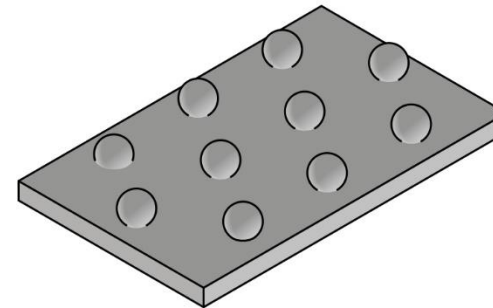
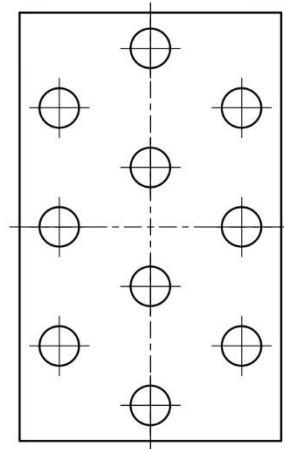
| CONCEPTO  | SUBTOTAL    |
|---|-------------|
| Coste total del presupuesto de ejecución material | 18.857,72 € |
| Gastos generales                                  | 565,73 €    |

**TOTAL: ..... 19.423,45€**

El importe total del proyecto suma la cantidad de:

**Diecinueve Mil Cuatrocientos Veintitrés Euros, con Cuarenta y Cinco Céntimos**

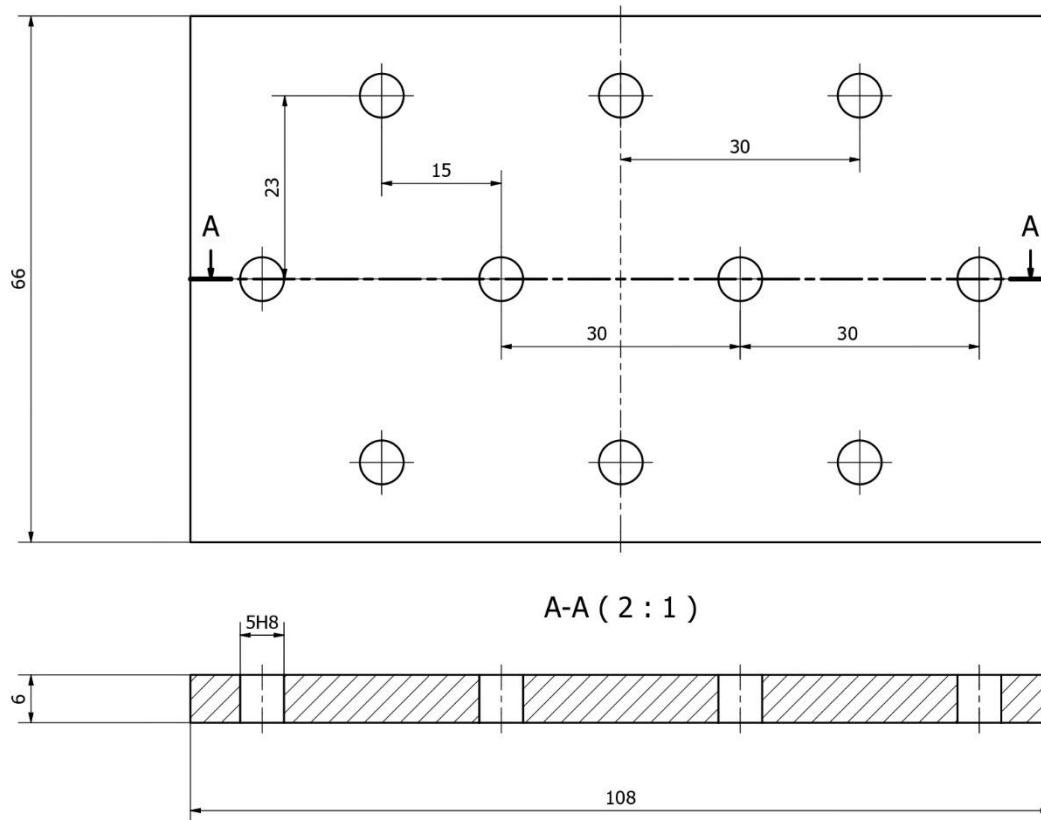
## 3. PLANOS



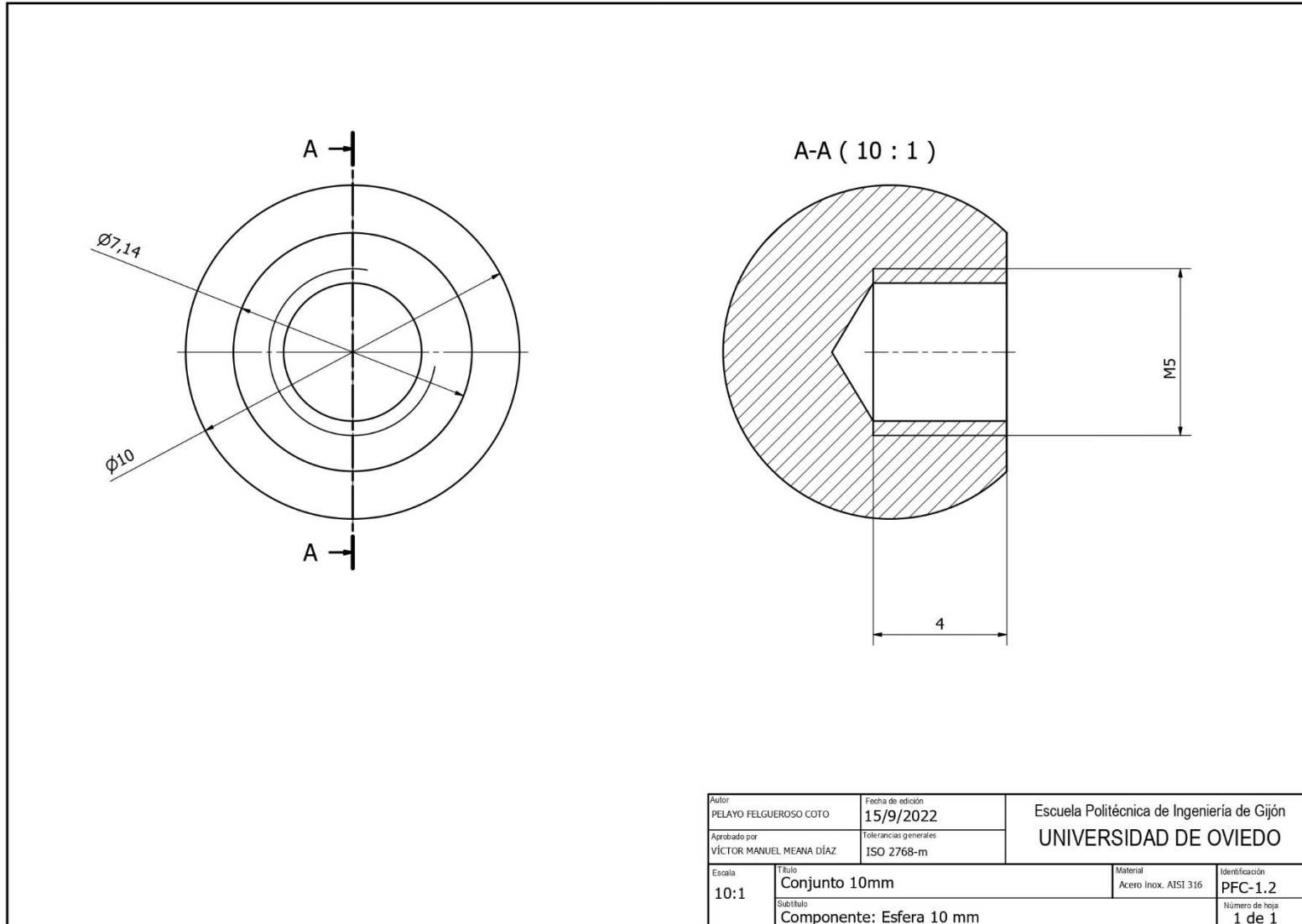
| LISTA DE PIEZAS |       |                   |                                  |
|-----------------|-------|-------------------|----------------------------------|
| ELEMENTO        | CTDAD | Nº DE PIEZA       | DESCRIPCIÓN                      |
| 1               | 10    | Esfera 10 mm      |                                  |
| 2               | 1     | Placa base 10 mm  |                                  |
| 3               | 10    | ISO 4762 - M5 x 8 | Tornillo Allen Cabeza Cilíndrica |

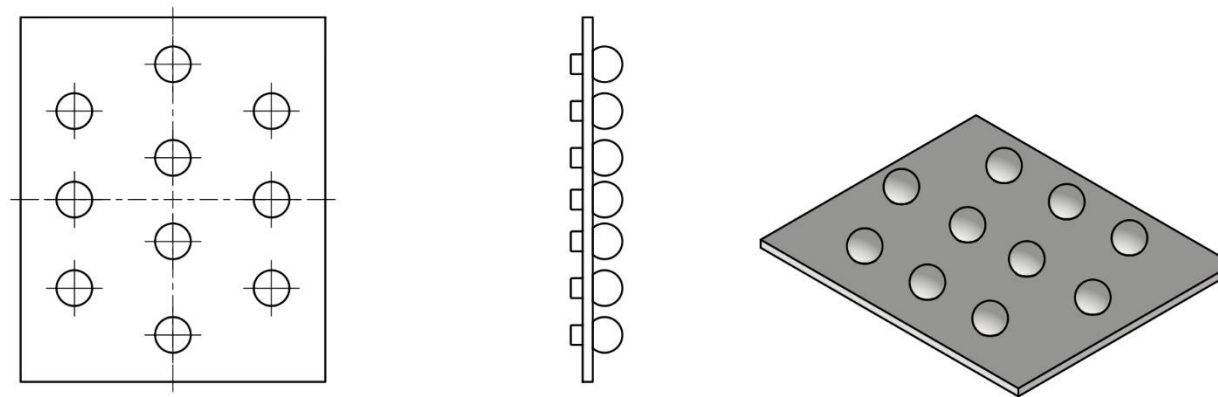
|  |                          |                                     |  |   |                          |
|--|--------------------------|-------------------------------------|--|---|--------------------------|
| Autor<br>PELAYO FELGUEROSO COTO          |                          | Fecha de edición<br>15/9/2022       |  | Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón<br>UNIVERSIDAD DE OVIEDO |                          |
| Aprobado por<br>VÍCTOR MANUEL MEANA DÍAZ |                          | Tolerancias generales<br>ISO 2768-m |  |   |                          |
| Escala<br>1:1                            | Título<br>Conjunto 10 mm |                                     |  | Material<br>Acero Inox. AISI 316                                    | Identificación<br>PFC-1  |
| Subtítulo<br>Ensamblaje conjunto 10 mm   |                          |                                     |  |   | Número de hoja<br>1 de 1 |





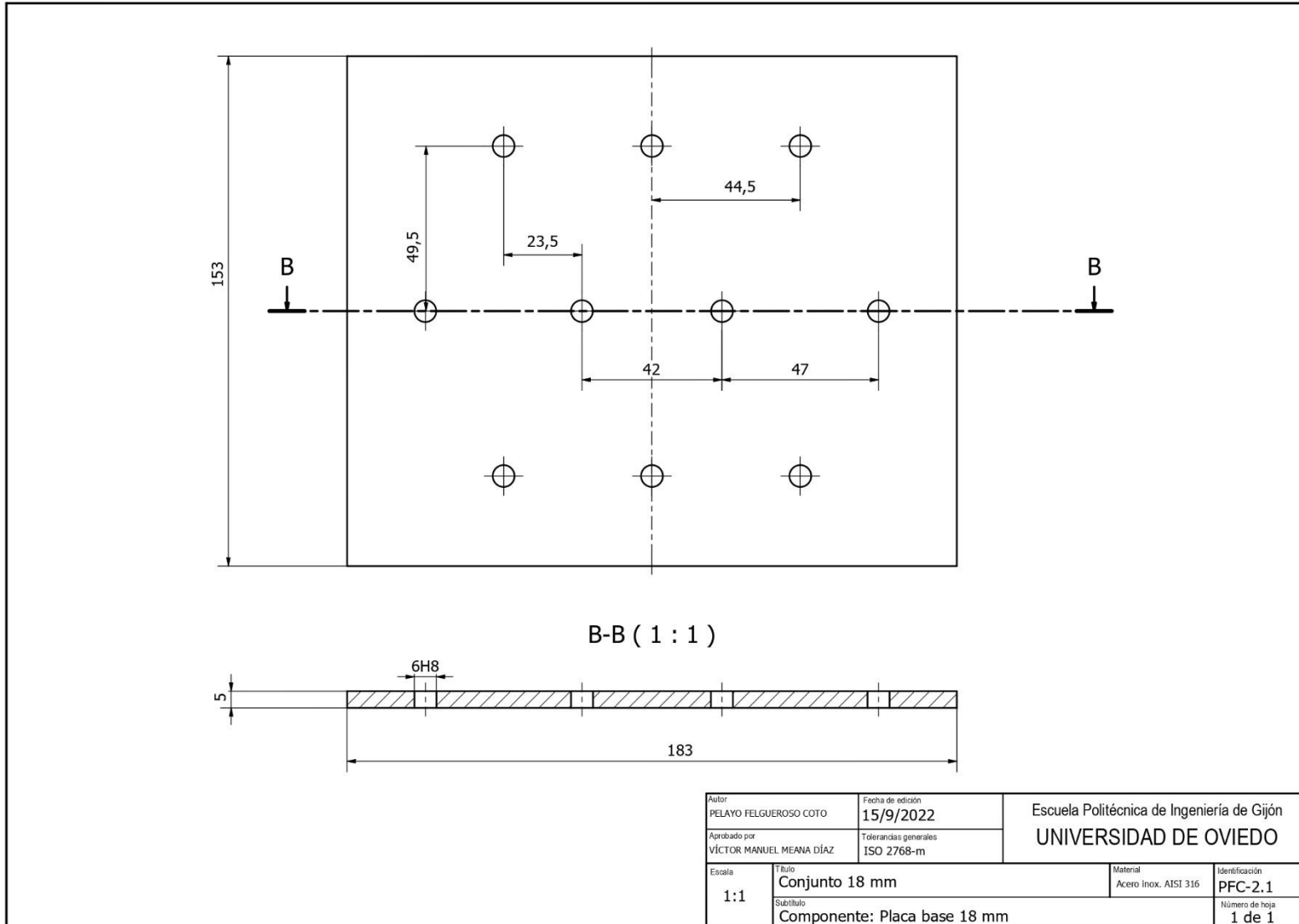
|   |                          |                                     |   |                           |
|---|--------------------------|-------------------------------------|---|---------------------------|
| Autor<br>PELAYO FELGUEROSO COTO           |                          | Fecha de edición<br>15/9/2022       | Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón<br>UNIVERSIDAD DE OVIEDO |                           |
| Aprobado por<br>VÍCTOR MANUEL MEANA DÍAZ  |                          | Tolerancias generales<br>ISO 2768-m |   |                           |
| Escala<br>2:1                             | Título<br>Conjunto 10 mm |                                     | Material<br>Acero inox. AISI 316                                    | Identificación<br>PFC-1.1 |
| Subtítulo<br>Componente: Placa base 10 mm |                          |                                     | Número de hoja<br>1 de 1  |                           |

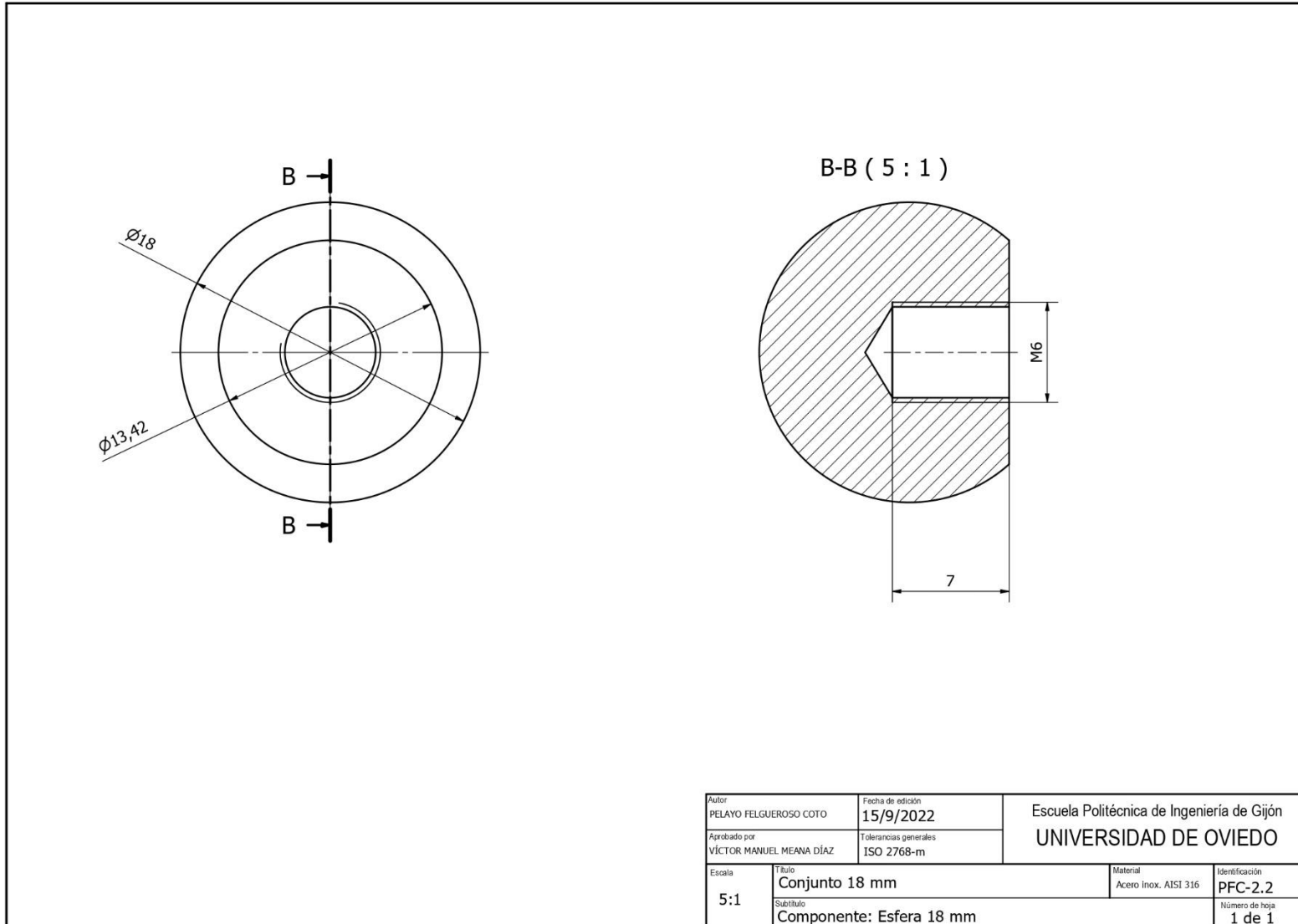


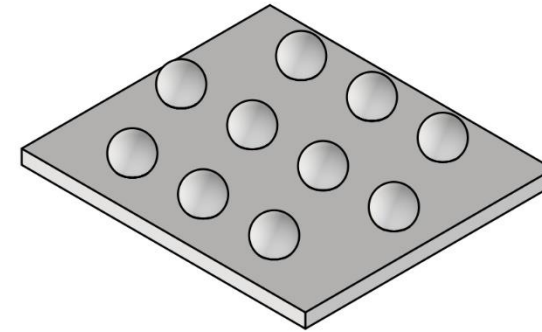
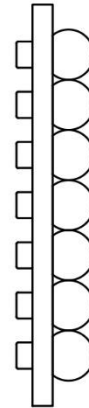
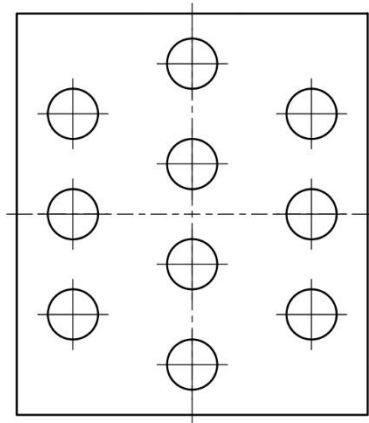


| LISTA DE PIEZAS |       |                    |                                  |
|-----------------|-------|--------------------|----------------------------------|
| ELEMENTO        | CTDAD | Nº DE PIEZA        | DESCRIPCIÓN                      |
| 1               | 1     | Placa base 18 mm   |                                  |
| 2               | 10    | Esfera 18 mm       |                                  |
| 3               | 10    | ISO 4762 - M6 x 10 | Tornillo Allen Cabeza Cilíndrica |

|  |  |                                     |  |                         |
|--|--|-------------------------------------|--|-------------------------|
| Autor<br>PELAYO FELGUEROSO COTO          |  | Fecha de edición<br>15/9/2022       | Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón |                         |
| Aprobado por<br>VÍCTOR MANUEL MEANA DÍAZ |  | Tolerancias generales<br>ISO 2768-m | UNIVERSIDAD DE OVIEDO                      |                         |
| Escala<br>1:2                            | Título<br>Conjunto 18 mm               |                                     | Material<br>Acero Inox. AISI 316           | Identificación<br>PFC-2 |
|  | Subtítulo<br>Ensamblaje conjunto 18 mm |                                     | Número de hoja<br>1 de 1                   |                         |

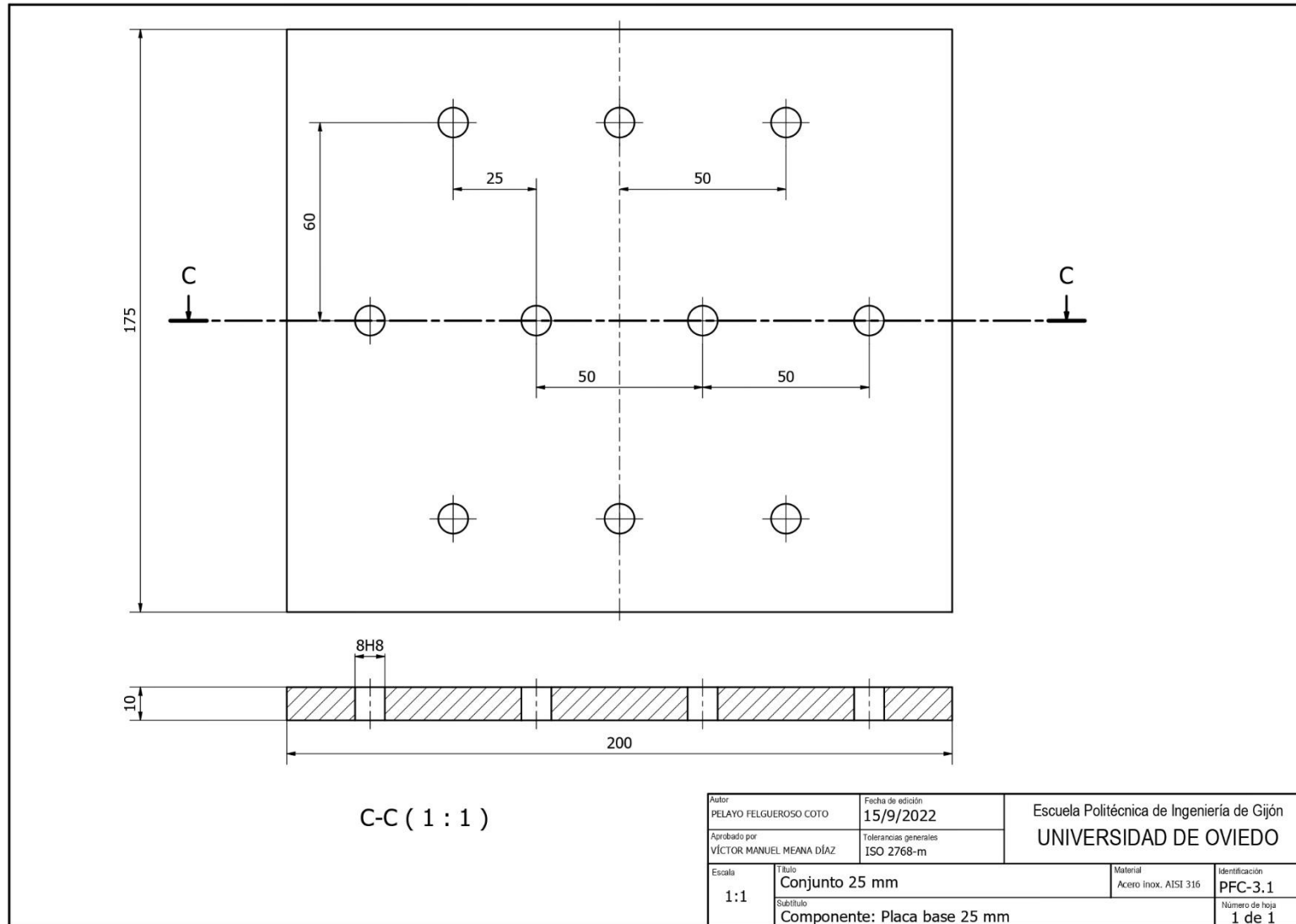




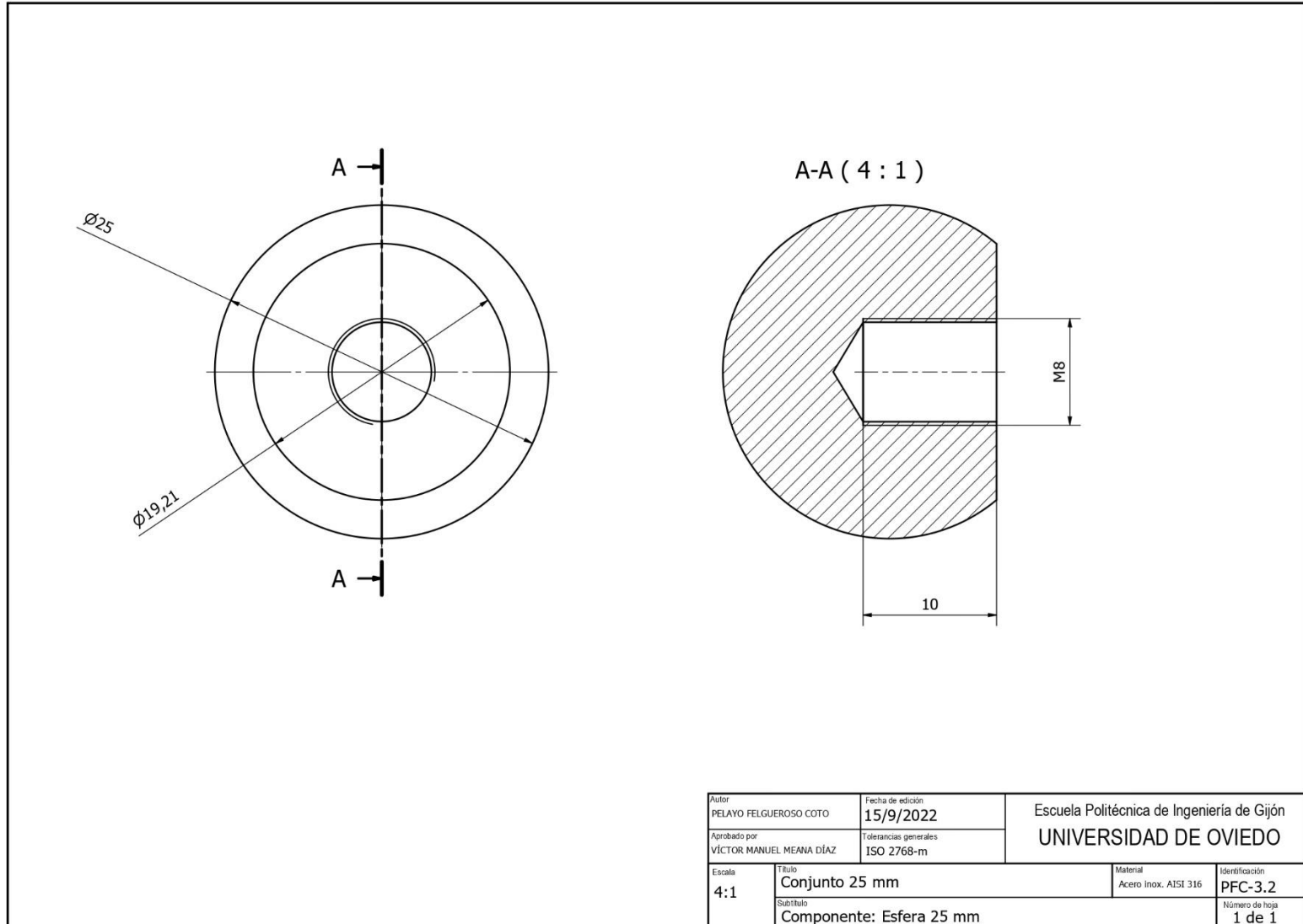


| LISTA DE PIEZAS |       |                    |                                  |
|-----------------|-------|--------------------|----------------------------------|
| ELEMENTO        | CTDAD | Nº DE PIEZA        | DESCRIPCIÓN                      |
| 1               | 1     | Placa base 25 mm   |                                  |
| 2               | 10    | Esfera 25 mm       |                                  |
| 3               | 10    | ISO 4762 - M8 x 16 | Tornillo Allen Cabeza Cilíndrica |

|  |                          |                                     |   |                         |
|--|--------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------|
| Autor<br>PELAYO FELGUEROSO COTO          |                          | Fecha de edición<br>15/9/2022       | Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón<br>UNIVERSIDAD DE OVIEDO |                         |
| Aprobado por<br>VÍCTOR MANUEL MEANA DÍAZ |                          | Tolerancias generales<br>ISO 2768-m |   |                         |
| Escala<br>1:2                            | Título<br>Conjunto 25 mm |                                     | Material<br>Acero Inox. AISI 316                                    | Identificación<br>PFC-3 |
| Subtítulo<br>Ensamblaje conjunto 25 mm   |                          |                                     | Número de hoja<br>1 de 1  |                         |







## 4. ANEXOS

## 4.1. ANEXO I: TABLAS DE RESULTADOS DE MEDICIÓN

### 4.1.1. Tablas de mediciones por contacto antes del tratamiento

*Tabla 27. Medidas de las esferas de 10mm por contacto (Pre-ácido)*

|               | CMM (PRE-ÁCIDO) |               |                |        |
|---------------|-----------------|---------------|----------------|--------|
|               | ESFERA          | Diámetro      | Error de Forma |        |
| DIÁMETRO 10mm | MEDIDA 1        | SPH 1         | 10,002         | 0,0019 |
|               |                 | SPH 2         | 10,0013        | 0,0035 |
|               |                 | SPH 3         | 10,0018        | 0,0025 |
|               |                 | SPH 4         | 10,002         | 0,0035 |
|               |                 | SPH 5         | 10,0019        | 0,0031 |
|               |                 | SPH 6         | 10,0017        | 0,0026 |
|               |                 | SPH 7         | 10,0015        | 0,0024 |
|               |                 | SPH 8         | 10,0014        | 0,0021 |
|               |                 | SPH 9         | 10,0016        | 0,0031 |
|               |                 | SPH 10        | 10,0017        | 0,0021 |
|               |                 | DIÁMETRO 10mm | MEDIDA 2       | SPH 1  |
| SPH 2         | 10,0019         |               |                | 0,0032 |
| SPH 3         | 10,0014         |               |                | 0,002  |
| SPH 4         | 10,0015         |               |                | 0,003  |
| SPH 5         | 10,0018         |               |                | 0,0027 |
| SPH 6         | 10,0017         |               |                | 0,0022 |
| SPH 7         | 10,0021         |               |                | 0,002  |
| SPH 8         | 10,0016         |               |                | 0,002  |
| SPH 9         | 10,0017         |               |                | 0,003  |
| SPH 10        | 10,0019         |               |                | 0,0025 |
| DIÁMETRO 10mm | MEDIDA 3        |               |                | SPH 1  |
|               |                 | SPH 2         | 10,0023        | 0,0032 |
|               |                 | SPH 3         | 10,0014        | 0,0017 |
|               |                 | SPH 4         | 10,002         | 0,0026 |
|               |                 | SPH 5         | 10,0012        | 0,004  |
|               |                 | SPH 6         | 10,0026        | 0,0074 |
|               |                 | SPH 7         | 10,0023        | 0,0015 |
|               |                 | SPH 8         | 10,0018        | 0,002  |
|               |                 | SPH 9         | 10,0025        | 0,0031 |
|               |                 | SPH 10        | 10,0023        | 0,0031 |
|               |                 | DIÁMETRO 10mm | MEDIDA 4       | SPH 1  |
| SPH 2         | 10,0027         |               |                | 0,0133 |
| SPH 3         | 10,0014         |               |                | 0,0017 |
| SPH 4         | 10,0017         |               |                | 0,0033 |
| SPH 5         | 10,0017         |               |                | 0,003  |
| SPH 6         | 10,0015         |               |                | 0,002  |
| SPH 7         | 10,0021         |               |                | 0,0017 |
| SPH 8         | 10,0021         |               |                | 0,0023 |
| SPH 9         | 10,0022         |               |                | 0,0026 |
| SPH 10        | 10,0023         |               |                | 0,002  |
| DIÁMETRO 10mm | MEDIDA 5        |               |                | SPH 1  |
|               |                 | SPH 2         | 10,0009        | 0,0041 |
|               |                 | SPH 3         | 10,0015        | 0,0051 |
|               |                 | SPH 4         | 10,0015        | 0,0024 |
|               |                 | SPH 5         | 10,0008        | 0,0048 |
|               |                 | SPH 6         | 10,0012        | 0,0061 |
|               |                 | SPH 7         | 10,0011        | 0,0018 |
|               |                 | SPH 8         | 10,0011        | 0,0026 |
|               |                 | SPH 9         | 10,0012        | 0,0027 |
|               |                 | SPH 10        | 10,001         | 0,0027 |

Tabla 28. Medidas de las esferas de 18mm por contacto (Pre-ácido)

| DIÁMETRO 18mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |          |                |
|---------------|-----------------|----------|----------|----------------|
|               | ESFERA          |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | MEDIDA 1 | 18,0064  | 0,0079         |
| SPH 2         | 18,0081         |          | 0,0027   |                |
| SPH 3         | 17,9994         |          | 0,0031   |                |
| SPH 4         | 18,0069         |          | 0,0038   |                |
| SPH 5         | 18,0084         |          | 0,0023   |                |
| SPH 6         | 18,0085         |          | 0,0081   |                |
| SPH 7         | 18,0064         |          | 0,0022   |                |
| SPH 8         | 18,0058         |          | 0,0039   |                |
| SPH 9         | 18,0062         |          | 0,0019   |                |
| SPH 10        | 18,0064         |          | 0,0017   |                |
| DIÁMETRO 18mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA          |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | MEDIDA 2 | 18,0064  | 0,0079         |
| SPH 2         | 18,0081         |          | 0,0027   |                |
| SPH 3         | 17,9994         |          | 0,0031   |                |
| SPH 4         | 18,0069         |          | 0,0038   |                |
| SPH 5         | 18,0084         |          | 0,0023   |                |
| SPH 6         | 18,0085         |          | 0,0081   |                |
| SPH 7         | 18,0064         |          | 0,0022   |                |
| SPH 8         | 18,0058         |          | 0,0039   |                |
| SPH 9         | 18,0062         |          | 0,0019   |                |
| SPH 10        | 18,0064         |          | 0,0017   |                |
| DIÁMETRO 18mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA          |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | MEDIDA 3 | 18,0059  | 0,0021         |
| SPH 2         | 18,0082         |          | 0,0056   |                |
| SPH 3         | 17,9988         |          | 0,0122   |                |
| SPH 4         | 18,007          |          | 0,0065   |                |
| SPH 5         | 18,0085         |          | 0,0023   |                |
| SPH 6         | 18,0084         |          | 0,0018   |                |
| SPH 7         | 18,0062         |          | 0,0024   |                |
| SPH 8         | 18,0058         |          | 0,0037   |                |
| SPH 9         | 18,0065         |          | 0,0021   |                |
| SPH 10        | 18,0063         |          | 0,0017   |                |
| DIÁMETRO 18mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA          |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | MEDIDA 4 | 18,0057  | 0,0016         |
| SPH 2         | 18,0077         |          | 0,0028   |                |
| SPH 3         | 18,0086         |          | 0,0028   |                |
| SPH 4         | 18,0068         |          | 0,0024   |                |
| SPH 5         | 18,0086         |          | 0,0023   |                |
| SPH 6         | 18,0088         |          | 0,0014   |                |
| SPH 7         | 18,0062         |          | 0,0022   |                |
| SPH 8         | 18,0061         |          | 0,0026   |                |
| SPH 9         | 18,0069         |          | 0,0026   |                |
| SPH 10        | 18,0066         |          | 0,0023   |                |
| DIÁMETRO 18mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA          |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | MEDIDA 5 | 18,0066  | 0,0019         |
| SPH 2         | 18,0086         |          | 0,0024   |                |
| SPH 3         | 18,0023         |          | 0,0021   |                |
| SPH 4         | 18,0077         |          | 0,0049   |                |
| SPH 5         | 18,0083         |          | 0,0026   |                |
| SPH 6         | 18,0087         |          | 0,0025   |                |
| SPH 7         | 18,0065         |          | 0,0022   |                |
| SPH 8         | 18,0062         |          | 0,0035   |                |
| SPH 9         | 18,0073         |          | 0,0025   |                |
| SPH 10        | 18,0069         |          | 0,0017   |                |

*Tabla 29. Medidas de las esferas de 25mm por contacto (Pre-ácido)*

| DIÁMETRO 25mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |                |
|---------------|-----------------|----------|----------------|
|               | ESFERA          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | 25,009   | 0,0065         |
| SPH 2         | 24,9945         | 0,0025   |                |
| SPH 3         | 25,0108         | 0,0078   |                |
| SPH 4         | 25,0091         | 0,0031   |                |
| SPH 5         | 25,0099         | 0,0066   |                |
| SPH 6         | 25,0096         | 0,008    |                |
| SPH 7         | 25,009          | 0,0098   |                |
| SPH 8         | 25,0099         | 0,0052   |                |
| SPH 9         | 25,0102         | 0,0063   |                |
| SPH 10        | 25,0098         | 0,0056   |                |
| DIÁMETRO 25mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |                |
|               | ESFERA          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | 25,009   | 0,0073         |
| SPH 2         | 24,9951         | 0,0026   |                |
| SPH 3         | 25,0106         | 0,0068   |                |
| SPH 4         | 25,0082         | 0,0039   |                |
| SPH 5         | 25,0094         | 0,0064   |                |
| SPH 6         | 25,0092         | 0,0051   |                |
| SPH 7         | 25,0084         | 0,0097   |                |
| SPH 8         | 25,0088         | 0,0087   |                |
| SPH 9         | 25,0098         | 0,007    |                |
| SPH 10        | 25,0091         | 0,055    |                |
| DIÁMETRO 25mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |                |
|               | ESFERA          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | 25,0085  | 0,0066         |
| SPH 2         | 24,9944         | 0,0025   |                |
| SPH 3         | 25,0102         | 0,0074   |                |
| SPH 4         | 25,0085         | 0,0039   |                |
| SPH 5         | 25,0095         | 0,0066   |                |
| SPH 6         | 25,0092         | 0,0066   |                |
| SPH 7         | 25,008          | 0,0108   |                |
| SPH 8         | 25,0089         | 0,0046   |                |
| SPH 9         | 25,0102         | 0,0063   |                |
| SPH 10        | 25,0093         | 0,0061   |                |
| DIÁMETRO 25mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |                |
|               | ESFERA          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | 25,0084  | 0,0065         |
| SPH 2         | 24,9944         | 0,0023   |                |
| SPH 3         | 25,01           | 0,008    |                |
| SPH 4         | 25,0086         | 0,0029   |                |
| SPH 5         | 25,0091         | 0,0051   |                |
| SPH 6         | 25,009          | 0,0058   |                |
| SPH 7         | 25,008          | 0,0106   |                |
| SPH 8         | 25,0089         | 0,005    |                |
| SPH 9         | 25,0101         | 0,0064   |                |
| SPH 10        | 25,0093         | 0,0061   |                |
| DIÁMETRO 25mm | CMM (PRE-ÁCIDO) |          |                |
|               | ESFERA          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1           | 25,0095  | 0,0075         |
| SPH 2         | 24,9955         | 0,0028   |                |
| SPH 3         | 25,0113         | 0,0061   |                |
| SPH 4         | 25,0099         | 0,0029   |                |
| SPH 5         | 25,0103         | 0,0055   |                |
| SPH 6         | 25,0099         | 0,0057   |                |
| SPH 7         | 25,009          | 0,005    |                |
| SPH 8         | 25,0099         | 0,0044   |                |
| SPH 9         | 25,0108         | 0,0064   |                |
| SPH 10        | 25,0101         | 0,0058   |                |

### 4.1.2. Tablas de mediciones sin contacto antes del tratamiento

Tabla 30. Medidas de las esferas de 10mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Pre-ácido)

| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ACIDO) |        |          |          |                |     |        |              |             |
|-------------------------------------|--------|----------|----------|----------------|-----|--------|--------------|-------------|
| DIÁMETRO 10mm                       | ESFERA |          | Diámetro | Error de Forma |     |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                     | SPH 1  | MEDIDA 1 |          | MIN            | MAX | MEDIDO |              |             |
|                                     |        |          | SPH 2    |                |     |        |              |             |
| SPH 3                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 4                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 5                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 6                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 7                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 8                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 9                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 10                              |        |          |          |                |     |        |              |             |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ACIDO) |        |          |          |                |     |        |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                       | ESFERA |          | Diámetro | Error de Forma |     |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                     | SPH 1  | MEDIDA 2 |          | MIN            | MAX | MEDIDO |              |             |
|                                     |        |          | SPH 2    |                |     |        |              |             |
| SPH 3                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 4                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 5                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 6                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 7                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 8                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 9                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 10                              |        |          |          |                |     |        |              |             |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ACIDO) |        |          |          |                |     |        |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                       | ESFERA |          | Diámetro | Error de Forma |     |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                     | SPH 1  | MEDIDA 3 |          | MIN            | MAX | MEDIDO |              |             |
|                                     |        |          | SPH 2    |                |     |        |              |             |
| SPH 3                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 4                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 5                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 6                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 7                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 8                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 9                               |        |          |          |                |     |        |              |             |
| SPH 10                              |        |          |          |                |     |        |              |             |

*Tabla 31. Medidas de las esferas de 18mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Pre-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
|-------------------------------------|----------|----------------|---------|---------|--------------|-------------|--------|--------|
| ESFERA                              | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|                                     |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 18mm                       | MEDIDA 1 | SPH 1          | 17,9535 | -0,0627 | 0,0628       | 0,1255      | 0,0256 | 38443  |
|                                     |          | SPH 2          | 17,9465 | -0,0599 | 0,06         | 0,1199      | 0,0248 | 31.657 |
|                                     |          | SPH 3          | 17,9425 | -0,061  | 0,061        | 0,122       | 0,0254 | 31.991 |
|                                     |          | SPH 4          | 17,9446 | -0,0619 | 0,062        | 0,1239      | 0,0249 | 30.921 |
|                                     |          | SPH 5          | 17,9498 | -0,0629 | 0,063        | 0,1259      | 0,0248 | 30.579 |
|                                     |          | SPH 6          | 17,9559 | -0,065  | 0,065        | 0,13        | 0,0255 | 35.052 |
|                                     |          | SPH 7          | 17,9462 | -0,0608 | 0,0608       | 0,1216      | 0,0244 | 31.156 |
|                                     |          | SPH 8          | 17,9543 | -0,063  | 0,063        | 0,126       | 0,026  | 40.439 |
|                                     |          | SPH 9          | 17,9444 | -0,059  | 0,059        | 0,118       | 0,0245 | 35.855 |
|                                     |          | SPH 10         | 17,9458 | -0,0594 | 0,0594       | 0,1188      | 0,0245 | 35.744 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
| ESFERA                              | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|                                     |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 18mm                       | MEDIDA 2 | SPH 1          | 17,9171 | -0,0711 | 0,0712       | 0,1423      | 0,0284 | 52.902 |
|                                     |          | SPH 2          | 17,9158 | -0,0702 | 0,0702       | 0,1404      | 0,0288 | 49.722 |
|                                     |          | SPH 3          | 17,9072 | -0,0718 | 0,0718       | 0,1436      | 0,0296 | 57.233 |
|                                     |          | SPH 4          | 17,9329 | -0,0765 | 0,0766       | 0,1531      | 0,0327 | 45.215 |
|                                     |          | SPH 5          | 17,9351 | -0,0744 | 0,0744       | 0,1488      | 0,031  | 51.824 |
|                                     |          | SPH 6          | 17,9391 | -0,0795 | 0,0796       | 0,1591      | 0,0333 | 44.205 |
|                                     |          | SPH 7          | 17,9306 | -0,0785 | 0,0786       | 0,1571      | 0,0333 | 45.108 |
|                                     |          | SPH 8          | 17,9276 | -0,0725 | 0,0726       | 0,1451      | 0,0292 | 49.947 |
|                                     |          | SPH 9          | 17,9185 | -0,0699 | 0,07         | 0,1399      | 0,0288 | 49.735 |
|                                     |          | SPH 10         | 17,9203 | -0,0701 | 0,0702       | 0,1403      | 0,0286 | 59.127 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
| ESFERA                              | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|                                     |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 18mm                       | MEDIDA 3 | SPH 1          | 17,795  | -0,0836 | 0,084        | 0,1676      | 0,0332 | 38.013 |
|                                     |          | SPH 2          | 17,7988 | -0,083  | 0,083        | 0,166       | 0,0333 | 35.527 |
|                                     |          | SPH 3          | 17,78   | -0,084  | 0,084        | 0,168       | 0,0341 | 40.628 |
|                                     |          | SPH 4          | 17,7879 | -0,0821 | 0,0822       | 0,1643      | 0,032  | 31.857 |
|                                     |          | SPH 5          | 17,7885 | -0,0801 | 0,0803       | 0,1604      | 0,0312 | 36.762 |
|                                     |          | SPH 6          | 17,7932 | -0,0811 | 0,0814       | 0,1625      | 0,0324 | 31.437 |
|                                     |          | SPH 7          | 17,7885 | -0,0822 | 0,0821       | 0,1643      | 0,0327 | 31.938 |
|                                     |          | SPH 8          | 17,801  | -0,0828 | 0,0834       | 0,1662      | 0,0339 | 34.748 |
|                                     |          | SPH 9          | 17,8005 | -0,0834 | 0,0836       | 0,167       | 0,0334 | 34.867 |
|                                     |          | SPH 10         | 17,7913 | -0,0821 | 0,0826       | 0,1647      | 0,0328 | 40.966 |



*Tabla 32. Medidas de las esferas de 25mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Pre-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
|-------------------------------------|----------|----------------|---------|---------|--------------|-------------|--------|--------|
| ESFERA                              | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|                                     |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 25mm                       | MEDIDA 1 | SPH 1          | 24,9258 | -0,0624 | 0,0624       | 0,1248      | 0,0257 | 69.465 |
|                                     |          | SPH 2          | 24,9111 | -0,0595 | 0,0596       | 0,1191      | 0,0251 | 67.869 |
|                                     |          | SPH 3          | 24,9278 | -0,0598 | 0,0598       | 0,1196      | 0,0252 | 66.559 |
|                                     |          | SPH 4          | 24,928  | -0,0598 | 0,0598       | 0,1196      | 0,0259 | 60.702 |
|                                     |          | SPH 5          | 24,9269 | -0,0637 | 0,0638       | 0,1275      | 0,0265 | 62.243 |
|                                     |          | SPH 6          | 24,9278 | -0,0596 | 0,0596       | 0,1192      | 0,025  | 70.200 |
|                                     |          | SPH 7          | 24,931  | -0,063  | 0,063        | 0,126       | 0,0268 | 61.127 |
|                                     |          | SPH 8          | 24,9338 | -0,0746 | 0,0746       | 0,1492      | 0,028  | 65.235 |
|                                     |          | SPH 9          | 24,9279 | -0,0592 | 0,0592       | 0,1184      | 0,025  | 62.560 |
|                                     |          | SPH 10         | 24,9381 | -0,0656 | 0,0658       | 0,1314      | 0,027  | 60.236 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
| ESFERA                              | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|                                     |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 25mm                       | MEDIDA 2 | SPH 1          | 24,8194 | -0,0804 | 0,0804       | 0,1608      | 0,0338 | 69.201 |
|                                     |          | SPH 2          | 24,8105 | -0,0788 | 0,0788       | 0,1576      | 0,0332 | 71.759 |
|                                     |          | SPH 3          | 24,8166 | -0,0767 | 0,0768       | 0,1535      | 0,0316 | 73.013 |
|                                     |          | SPH 4          | 24,8224 | -0,0792 | 0,0792       | 0,1584      | 0,0331 | 60.808 |
|                                     |          | SPH 5          | 24,8224 | -0,0789 | 0,079        | 0,1579      | 0,0329 | 66.064 |
|                                     |          | SPH 6          | 24,8242 | -0,0784 | 0,0784       | 0,1568      | 0,0329 | 68.431 |
|                                     |          | SPH 7          | 24,8165 | -0,079  | 0,0792       | 0,1582      | 0,0331 | 59.904 |
|                                     |          | SPH 8          | 24,817  | -0,0799 | 0,08         | 0,1599      | 0,0333 | 61.651 |
|                                     |          | SPH 9          | 24,8208 | -0,076  | 0,076        | 0,152       | 0,032  | 62.830 |
|                                     |          | SPH 10         | 24,8184 | -0,0811 | 0,0812       | 0,1623      | 0,0333 | 59.854 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (PRE-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
| ESFERA                              | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|                                     |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 25mm                       | MEDIDA 3 | SPH 1          | 24,7954 | -0,085  | 0,085        | 0,17        | 0,0358 | 67.017 |
|                                     |          | SPH 2          | 24,786  | -0,0833 | 0,0834       | 0,1667      | 0,0352 | 69.379 |
|                                     |          | SPH 3          | 24,7895 | -0,0816 | 0,0818       | 0,1634      | 0,0336 | 70.852 |
|                                     |          | SPH 4          | 24,7982 | -0,0823 | 0,0824       | 0,1647      | 0,0349 | 60.699 |
|                                     |          | SPH 5          | 24,7961 | -0,0816 | 0,0816       | 0,1632      | 0,0341 | 65.805 |
|                                     |          | SPH 6          | 24,7995 | -0,0829 | 0,0831       | 0,166       | 0,0349 | 67.861 |
|                                     |          | SPH 7          | 24,7926 | -0,0819 | 0,082        | 0,1639      | 0,0345 | 60.155 |
|                                     |          | SPH 8          | 24,792  | -0,084  | 0,084        | 0,168       | 0,0348 | 61.757 |
|                                     |          | SPH 9          | 24,7962 | -0,0802 | 0,0804       | 0,1606      | 0,0338 | 62.664 |
|                                     |          | SPH 10         | 24,7927 | -0,0852 | 0,0852       | 0,1704      | 0,0348 | 59.967 |

### 4.1.3. Tablas de mediciones por contacto después del tratamiento

Tabla 33. Medidas de las esferas de 10mm por contacto (Post-ácido)

| DIÁMETRO 10mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|---------------|------------------|----------|----------|----------------|
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 1 | 9,9632   | 0,017          |
| SPH 2         | 9,9556           |          | 0,0247   |                |
| SPH 3         | 9,9358           |          | 0,0256   |                |
| SPH 4         | 9,9727           |          | 0,0137   |                |
| SPH 5         | 9,959            |          | 0,021    |                |
| SPH 6         | 9,9293           |          | 0,0343   |                |
| SPH 7         | 9,938            |          | 0,0385   |                |
| SPH 8         | 9,9622           |          | 0,0177   |                |
| SPH 9         | 9,9494           |          | 0,0271   |                |
| SPH 10        | 9,9317           |          | 0,0358   |                |
| DIÁMETRO 10mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 2 | 9,9632   | 0,0172         |
| SPH 2         | 9,9551           |          | 0,0247   |                |
| SPH 3         | 9,9352           |          | 0,0255   |                |
| SPH 4         | 9,9725           |          | 0,0137   |                |
| SPH 5         | 9,9586           |          | 0,0212   |                |
| SPH 6         | 9,929            |          | 0,0345   |                |
| SPH 7         | 9,9377           |          | 0,0385   |                |
| SPH 8         | 9,9618           |          | 0,0178   |                |
| SPH 9         | 9,9494           |          | 0,0273   |                |
| SPH 10        | 9,9316           |          | 0,0357   |                |
| DIÁMETRO 10mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 3 | 9,962    | 0,0161         |
| SPH 2         | 9,9537           |          | 0,0247   |                |
| SPH 3         | 9,9345           |          | 0,0247   |                |
| SPH 4         | 9,9722           |          | 0,0133   |                |
| SPH 5         | 9,9585           |          | 0,0205   |                |
| SPH 6         | 9,9302           |          | 0,0331   |                |
| SPH 7         | 9,9385           |          | 0,036    |                |
| SPH 8         | 9,9607           |          | 0,0204   |                |
| SPH 9         | 9,9496           |          | 0,0287   |                |
| SPH 10        | 9,9315           |          | 0,0376   |                |
| DIÁMETRO 10mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 4 | 9,9628   | 0,018          |
| SPH 2         | 9,9534           |          | 0,0318   |                |
| SPH 3         | 9,9347           |          | 0,0237   |                |
| SPH 4         | 9,972            |          | 0,0143   |                |
| SPH 5         | 9,9595           |          | 0,0366   |                |
| SPH 6         | 9,9279           |          | 0,0346   |                |
| SPH 7         | 9,9377           |          | 0,0383   |                |
| SPH 8         | 9,9612           |          | 0,0172   |                |
| SPH 9         | 9,9493           |          | 0,0276   |                |
| SPH 10        | 9,9312           |          | 0,0381   |                |
| DIÁMETRO 10mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 5 | 9,9625   | 0,0178         |
| SPH 2         | 9,9533           |          | 0,0316   |                |
| SPH 3         | 9,9345           |          | 0,0237   |                |
| SPH 4         | 9,9717           |          | 0,0139   |                |
| SPH 5         | 9,958            |          | 0,0364   |                |
| SPH 6         | 9,928            |          | 0,0341   |                |
| SPH 7         | 9,9372           |          | 0,0385   |                |
| SPH 8         | 9,9609           |          | 0,0171   |                |
| SPH 9         | 9,9487           |          | 0,0275   |                |
| SPH 10        | 9,9308           |          | 0,0379   |                |

*Tabla 34. Medidas de las esferas de 18mm por contacto (Post-ácido)*

| DIÁMETRO 18mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|---------------|------------------|----------|----------|----------------|
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 1 | 17,9598  | 0,0298         |
| SPH 2         | 17,9554          |          | 0,029    |                |
| SPH 3         | 17,981           |          | 0,0792   |                |
| SPH 4         | 17,9681          |          | 0,0276   |                |
| SPH 5         | 17,9615          |          | 0,0306   |                |
| SPH 6         | 17,9414          |          | 0,0253   |                |
| SPH 7         | 17,941           |          | 0,0247   |                |
| SPH 8         | 17,9725          |          | 0,0316   |                |
| SPH 9         | 17,9534          |          | 0,0262   |                |
| SPH 10        | 17,9479          |          | 0,0275   |                |
| DIÁMETRO 18mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 2 | 17,9591  | 0,0294         |
| SPH 2         | 17,9554          |          | 0,0293   |                |
| SPH 3         | 17,9498          |          | 0,0354   |                |
| SPH 4         | 17,9677          |          | 0,0281   |                |
| SPH 5         | 17,9618          |          | 0,028    |                |
| SPH 6         | 17,9405          |          | 0,0228   |                |
| SPH 7         | 17,9392          |          | 0,0229   |                |
| SPH 8         | 17,9753          |          | 0,0314   |                |
| SPH 9         | 17,9514          |          | 0,027    |                |
| SPH 10        | 17,9481          |          | 0,0264   |                |
| DIÁMETRO 18mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 3 | 17,959   | 0,0299         |
| SPH 2         | 17,9554          |          | 0,0296   |                |
| SPH 3         | 17,9496          |          | 0,0358   |                |
| SPH 4         | 17,9678          |          | 0,028    |                |
| SPH 5         | 17,9618          |          | 0,0277   |                |
| SPH 6         | 17,9405          |          | 0,0226   |                |
| SPH 7         | 17,9389          |          | 0,023    |                |
| SPH 8         | 17,9741          |          | 0,0293   |                |
| SPH 9         | 17,9515          |          | 0,0271   |                |
| SPH 10        | 17,9477          |          | 0,0264   |                |
| DIÁMETRO 18mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 4 | 17,9591  | 0,0296         |
| SPH 2         | 17,9556          |          | 0,029    |                |
| SPH 3         | 17,9497          |          | 0,0356   |                |
| SPH 4         | 17,9678          |          | 0,0279   |                |
| SPH 5         | 17,9618          |          | 0,0277   |                |
| SPH 6         | 17,9405          |          | 0,0223   |                |
| SPH 7         | 17,9388          |          | 0,0229   |                |
| SPH 8         | 17,974           |          | 0,029    |                |
| SPH 9         | 17,9514          |          | 0,0271   |                |
| SPH 10        | 17,9477          |          | 0,027    |                |
| DIÁMETRO 18mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 5 | 17,9591  | 0,0297         |
| SPH 2         | 17,9556          |          | 0,0296   |                |
| SPH 3         | 17,9497          |          | 0,0356   |                |
| SPH 4         | 17,9678          |          | 0,028    |                |
| SPH 5         | 17,9617          |          | 0,0277   |                |
| SPH 6         | 17,9404          |          | 0,023    |                |
| SPH 7         | 17,9388          |          | 0,0231   |                |
| SPH 8         | 17,974           |          | 0,0291   |                |
| SPH 9         | 17,9515          |          | 0,0265   |                |
| SPH 10        | 17,9476          |          | 0,0267   |                |

*Tabla 35. Medidas de las esferas de 25mm por contacto (Post-ácido)*

| DIÁMETRO 25mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|---------------|------------------|----------|----------|----------------|
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 1 | 24,9302  | 0,0286         |
| SPH 2         | 24,9136          |          | 0,0214   |                |
| SPH 3         | 24,9391          |          | 0,0351   |                |
| SPH 4         | 24,9255          |          | 0,0207   |                |
| SPH 5         | 24,9251          |          | 0,0249   |                |
| SPH 6         | 24,922           |          | 0,0199   |                |
| SPH 7         | 24,9355          |          | 0,032    |                |
| SPH 8         | 24,9303          |          | 0,0233   |                |
| SPH 9         | 24,9357          |          | 0,0364   |                |
| SPH 10        | 24,9361          |          | 0,032    |                |
| DIÁMETRO 25mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 2 | 24,9283  | 0,0215         |
| SPH 2         | 24,9178          |          | 0,0187   |                |
| SPH 3         | 24,9358          |          | 0,03     |                |
| SPH 4         | 24,9257          |          | 0,0145   |                |
| SPH 5         | 24,9254          |          | 0,0198   |                |
| SPH 6         | 24,9277          |          | 0,0171   |                |
| SPH 7         | 24,9385          |          | 0,0229   |                |
| SPH 8         | 24,9379          |          | 0,0203   |                |
| SPH 9         | 24,9312          |          | 0,0251   |                |
| SPH 10        | 24,9283          |          | 0,0235   |                |
| DIÁMETRO 25mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 3 | 24,9294  | 0,0214         |
| SPH 2         | 24,9177          |          | 0,0187   |                |
| SPH 3         | 24,9351          |          | 0,0279   |                |
| SPH 4         | 24,9256          |          | 0,0146   |                |
| SPH 5         | 24,9256          |          | 0,0197   |                |
| SPH 6         | 24,9274          |          | 0,0168   |                |
| SPH 7         | 24,9385          |          | 0,0229   |                |
| SPH 8         | 24,9377          |          | 0,0206   |                |
| SPH 9         | 24,9308          |          | 0,0251   |                |
| SPH 10        | 24,9276          |          | 0,0236   |                |
| DIÁMETRO 25mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 4 | 24,9334  | 0,0195         |
| SPH 2         | 24,9119          |          | 0,0145   |                |
| SPH 3         | 24,9347          |          | 0,0266   |                |
| SPH 4         | 24,9259          |          | 0,0106   |                |
| SPH 5         | 24,9255          |          | 0,0196   |                |
| SPH 6         | 24,9276          |          | 0,0171   |                |
| SPH 7         | 24,9384          |          | 0,0226   |                |
| SPH 8         | 24,9328          |          | 0,0141   |                |
| SPH 9         | 24,9348          |          | 0,0231   |                |
| SPH 10        | 24,9275          |          | 0,0236   |                |
| DIÁMETRO 25mm | CMM (POST-ÁCIDO) |          |          |                |
|               | ESFERA           |          | Diámetro | Error de Forma |
|               | SPH 1            | MEDIDA 5 | 24,933   | 0,0199         |
| SPH 2         | 24,9115          |          | 0,0144   |                |
| SPH 3         | 24,9346          |          | 0,0266   |                |
| SPH 4         | 24,9259          |          | 0,0145   |                |
| SPH 5         | 24,9256          |          | 0,0194   |                |
| SPH 6         | 24,9272          |          | 0,016    |                |
| SPH 7         | 24,9383          |          | 0,0231   |                |
| SPH 8         | 24,9319          |          | 0,0142   |                |
| SPH 9         | 24,9343          |          | 0,0234   |                |
| SPH 10        | 24,9275          |          | 0,0235   |                |

#### 4.1.4. Tablas de mediciones sin contacto después del tratamiento

##### 4.1.4.1. Ganancia alta

Tabla 36. Medidas de las esferas de 10mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Post-ácido)

| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |        |         |          |                |        |         |              |             |
|--------------------------------------|--------|---------|----------|----------------|--------|---------|--------------|-------------|
| DIÁMETRO 10mm                        | ESFERA |         | Diámetro | Error de Forma |        |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                      |        |         |          | MIN            | MAX    | MEDIDO  |              |             |
|                                      |        |         | SPH 1    | MEDIDA 1       | 9,9296 | -0,0493 | 0,0496       | 0,0989      |
| SPH 2                                | 9,9148 | -0,0571 | 0,0574   |                | 0,1145 | 0,0252  | 20687        |             |
| SPH 3                                | 9,9049 | -0,0458 | 0,0472   |                | 0,093  | 0,0204  | 13403        |             |
| SPH 4                                | 9,9338 | -0,0457 | 0,0458   |                | 0,0915 | 0,0189  | 13330        |             |
| SPH 5                                | 9,9159 | -0,0433 | 0,0444   |                | 0,0877 | 0,0189  | 13343        |             |
| SPH 6                                | 9,8825 | -0,0469 | 0,047    |                | 0,0939 | 0,0193  | 13155        |             |
| SPH 7                                | 9,8644 | -0,0463 | 0,0491   |                | 0,0954 | 0,0197  | 13082        |             |
| SPH 8                                | 9,9166 | -0,0514 | 0,0519   |                | 0,1033 | 0,0211  | 13445        |             |
| SPH 9                                | 9,8944 | -0,0539 | 0,055    |                | 0,1089 | 0,0243  | 20092        |             |
| SPH 10                               | 9,8829 | -0,0516 | 0,052    |                | 0,1036 | 0,0216  | 13181        |             |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |        |         |          |                |        |         |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                        | ESFERA |         | Diámetro | Error de Forma |        |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                      |        |         |          | MIN            | MAX    | MEDIDO  |              |             |
|                                      |        |         | SPH 1    | MEDIDA 1       | 9,9248 | -0,051  | 0,051        | 0,102       |
| SPH 2                                | 9,912  | -0,0597 | 0,06     |                | 0,1197 | 0,0268  | 20678        |             |
| SPH 3                                | 9,9025 | -0,0488 | 0,0494   |                | 0,0982 | 0,0214  | 13429        |             |
| SPH 4                                | 9,9302 | -0,0467 | 0,0485   |                | 0,0952 | 0,0199  | 13346        |             |
| SPH 5                                | 9,9147 | -0,0474 | 0,0481   |                | 0,0955 | 0,0201  | 13328        |             |
| SPH 6                                | 9,8768 | -0,0482 | 0,0491   |                | 0,0973 | 0,0199  | 13108        |             |
| SPH 7                                | 9,8634 | -0,0499 | 0,0514   |                | 0,1013 | 0,0209  | 13114        |             |
| SPH 8                                | 9,9187 | -0,0516 | 0,0576   |                | 0,1092 | 0,0232  | 13646        |             |
| SPH 9                                | 9,8914 | -0,0586 | 0,0588   |                | 0,1174 | 0,0261  | 20185        |             |
| SPH 10                               | 9,88   | -0,0534 | 0,0542   |                | 0,1076 | 0,0225  | 13185        |             |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |        |         |          |                |        |         |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                        | ESFERA |         | Diámetro | Error de Forma |        |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                      |        |         |          | MIN            | MAX    | MEDIDO  |              |             |
|                                      |        |         | SPH 1    | MEDIDA 1       | 9,9189 | -0,0515 | 0,0522       | 0,1037      |
| SPH 2                                | 9,914  | -0,0714 | 0,0759   |                | 0,1473 | 0,0291  | 21247        |             |
| SPH 3                                | 9,8969 | -0,0511 | 0,0515   |                | 0,1026 | 0,0223  | 13512        |             |
| SPH 4                                | 9,928  | -0,0522 | 0,0524   |                | 0,1046 | 0,0216  | 13598        |             |
| SPH 5                                | 9,9098 | -0,0474 | 0,0498   |                | 0,0972 | 0,0211  | 13465        |             |
| SPH 6                                | 9,8752 | -0,0499 | 0,051    |                | 0,1009 | 0,0209  | 13198        |             |
| SPH 7                                | 9,8604 | -0,0523 | 0,0544   |                | 0,1067 | 0,0223  | 13281        |             |
| SPH 8                                | 9,9191 | -0,0532 | 0,0671   |                | 0,1203 | 0,0252  | 13954        |             |
| SPH 9                                | 9,8877 | -0,0595 | 0,0599   |                | 0,1194 | 0,0265  | 20305        |             |
| SPH 10                               | 9,8766 | -0,0564 | 0,0576   |                | 0,114  | 0,0237  | 13316        |             |

*Tabla 37. Medidas de las esferas de 18mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Post-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |       |
|--------------------------------------|----------|----------------|---------|---------|--------------|-------------|--------|-------|
| ESFERA                               | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |       |
|                                      |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |       |
| DIÁMETRO 18mm                        | MEDIDA 1 | SPH 1          | 17,9517 | -0,042  | 0,042        | 0,084       | 0,0181 | 52723 |
|                                      |          | SPH 2          | 17,9424 | -0,037  | 0,037        | 0,074       | 0,0158 | 46022 |
|                                      |          | SPH 3          | 17,9215 | -0,0362 | 0,0362       | 0,0724      | 0,015  | 46533 |
|                                      |          | SPH 4          | 17,9577 | -0,0362 | 0,0362       | 0,0724      | 0,0154 | 42392 |
|                                      |          | SPH 5          | 17,949  | -0,0374 | 0,0374       | 0,0748      | 0,0158 | 42322 |
|                                      |          | SPH 6          | 17,9344 | -0,0402 | 0,0402       | 0,0804      | 0,0177 | 44191 |
|                                      |          | SPH 7          | 17,9293 | -0,0366 | 0,0366       | 0,0732      | 0,0155 | 42161 |
|                                      |          | SPH 8          | 17,9496 | -0,0416 | 0,0416       | 0,0832      | 0,0182 | 52194 |
|                                      |          | SPH 9          | 17,9356 | -0,0392 | 0,0392       | 0,0784      | 0,0168 | 45803 |
|                                      |          | SPH 10         | 17,9238 | -0,04   | 0,04         | 0,08        | 0,0172 | 47747 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |       |
| ESFERA                               | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |       |
|                                      |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |       |
| DIÁMETRO 18mm                        | MEDIDA 1 | SPH 1          | 17,9369 | -0,0485 | 0,0486       | 0,0971      | 0,0214 | 52870 |
|                                      |          | SPH 2          | 17,9229 | -0,0421 | 0,0422       | 0,0843      | 0,018  | 45950 |
|                                      |          | SPH 3          | 17,9011 | -0,0423 | 0,0424       | 0,0847      | 0,0175 | 46423 |
|                                      |          | SPH 4          | 17,9455 | -0,0432 | 0,0432       | 0,0864      | 0,0192 | 42616 |
|                                      |          | SPH 5          | 17,9363 | -0,0438 | 0,0438       | 0,0876      | 0,0193 | 42403 |
|                                      |          | SPH 6          | 17,9232 | -0,0464 | 0,0464       | 0,0928      | 0,0208 | 44432 |
|                                      |          | SPH 7          | 17,9153 | -0,0424 | 0,0424       | 0,0848      | 0,0187 | 42481 |
|                                      |          | SPH 8          | 17,9349 | -0,0478 | 0,0478       | 0,0956      | 0,0213 | 52444 |
|                                      |          | SPH 9          | 17,9169 | -0,0445 | 0,0446       | 0,0891      | 0,0192 | 45936 |
|                                      |          | SPH 10         | 17,9058 | -0,0461 | 0,0462       | 0,0923      | 0,0203 | 47961 |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |       |
| ESFERA                               | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |       |
|                                      |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |       |
| DIÁMETRO 18mm                        | MEDIDA 1 | SPH 1          | 17,9273 | -0,0536 | 0,0536       | 0,1072      | 0,0238 | 52620 |
|                                      |          | SPH 2          | 17,911  | -0,0482 | 0,0482       | 0,0964      | 0,0205 | 45357 |
|                                      |          | SPH 3          | 17,8888 | -0,048  | 0,0484       | 0,0964      | 0,0201 | 46103 |
|                                      |          | SPH 4          | 17,9363 | -0,0484 | 0,0484       | 0,0968      | 0,0216 | 42247 |
|                                      |          | SPH 5          | 17,9252 | -0,0486 | 0,0486       | 0,0972      | 0,0213 | 41969 |
|                                      |          | SPH 6          | 17,9141 | -0,051  | 0,0511       | 0,1021      | 0,0229 | 44136 |
|                                      |          | SPH 7          | 17,9033 | -0,0484 | 0,0484       | 0,0968      | 0,0213 | 41928 |
|                                      |          | SPH 8          | 17,9265 | -0,053  | 0,053        | 0,106       | 0,0239 | 52450 |
|                                      |          | SPH 9          | 17,9056 | -0,0506 | 0,0506       | 0,1012      | 0,0218 | 45576 |
|                                      |          | SPH 10         | 17,8932 | -0,0522 | 0,0522       | 0,1044      | 0,023  | 47608 |

*Tabla 38. Medidas de las esferas de 25mm HP-L-10.6® en Ganancia Alta (Post-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |   |          |          |                |        |        |              |             |
|--------------------------------------|---|----------|----------|----------------|--------|--------|--------------|-------------|
| DIÁMETRO 25mm                        | ESFERA  |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                      | SPH 1<br>SPH 2<br>SPH 3<br>SPH 4<br>SPH 5<br>SPH 6<br>SPH 7<br>SPH 8<br>SPH 9<br>SPH 10 | MEDIDA 1 |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
|                                      |   |          | 24,8877  | -0,0425        | 0,0427 | 0,0852 | 0,0182       | 85527       |
| 24,8742                              | -0,0393   | 0,0395   | 0,0788   | 0,0158         | 83886  |        |              |             |
| 24,8988                              | -0,0433   | 0,0434   | 0,0867   | 0,0184         | 86078  |        |              |             |
| 24,8849                              | -0,041  | 0,041    | 0,082    | 0,0168         | 84192  |        |              |             |
| 24,8816                              | -0,0433   | 0,0434   | 0,0867   | 0,0186         | 86096  |        |              |             |
| 24,8821                              | -0,0434   | 0,0434   | 0,0868   | 0,0185         | 89082  |        |              |             |
| 24,8948                              | -0,043  | 0,043    | 0,086    | 0,0174         | 84198  |        |              |             |
| 24,8943                              | -0,0443   | 0,0444   | 0,0887   | 0,0191         | 87875  |        |              |             |
| 24,8942                              | -0,041  | 0,041    | 0,082    | 0,0169         | 84353  |        |              |             |
| 24,8966                              | -0,0436   | 0,0436   | 0,0872   | 0,0184         | 84909  |        |              |             |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |   |          |          |                |        |        |              |             |
| DIÁMETRO 25mm                        | ESFERA  |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                      | SPH 1<br>SPH 2<br>SPH 3<br>SPH 4<br>SPH 5<br>SPH 6<br>SPH 7<br>SPH 8<br>SPH 9<br>SPH 10 | MEDIDA 1 |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
|                                      |   |          | 24,8741  | -0,0462        | 0,0463 | 0,0925 | 0,0196       | 85143       |
| 24,8604                              | -0,0432   | 0,0432   | 0,0864   | 0,0173         | 83761  |        |              |             |
| 24,885                               | -0,0463   | 0,0464   | 0,0927   | 0,0197         | 85966  |        |              |             |
| 24,8711                              | -0,0439   | 0,044    | 0,0879   | 0,0181         | 83831  |        |              |             |
| 24,8679                              | -0,0463   | 0,0464   | 0,0927   | 0,0198         | 85667  |        |              |             |
| 24,8695                              | -0,0468   | 0,0468   | 0,0936   | 0,0198         | 88913  |        |              |             |
| 24,882                               | -0,0461   | 0,0462   | 0,0923   | 0,0189         | 84101  |        |              |             |
| 24,8815                              | -0,0469   | 0,047    | 0,0939   | 0,0201         | 87423  |        |              |             |
| 24,8788                              | -0,0444   | 0,0444   | 0,0888   | 0,0183         | 83919  |        |              |             |
| 24,8805                              | -0,0464   | 0,0464   | 0,0928   | 0,0195         | 84442  |        |              |             |
| HP-L-10.6 GANANCIA ALTA (POST-ÁCIDO) |   |          |          |                |        |        |              |             |
| DIÁMETRO 25mm                        | ESFERA  |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|                                      | SPH 1<br>SPH 2<br>SPH 3<br>SPH 4<br>SPH 5<br>SPH 6<br>SPH 7<br>SPH 8<br>SPH 9<br>SPH 10 | MEDIDA 1 |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
|                                      |   |          | 24,8665  | -0,0491        | 0,0495 | 0,0986 | 0,021        | 85319       |
| 24,8513                              | -0,0463   | 0,0464   | 0,0927   | 0,0185         | 83678  |        |              |             |
| 24,8755                              | -0,0495   | 0,0497   | 0,0992   | 0,0208         | 85605  |        |              |             |
| 24,8625                              | -0,0477   | 0,0478   | 0,0955   | 0,0196         | 83836  |        |              |             |
| 24,8582                              | -0,0494   | 0,0494   | 0,0988   | 0,0208         | 85498  |        |              |             |
| 24,8601                              | -0,0495   | 0,0497   | 0,0992   | 0,0209         | 88927  |        |              |             |
| 24,8715                              | -0,0491   | 0,0495   | 0,0986   | 0,02           | 83761  |        |              |             |
| 24,8726                              | -0,0502   | 0,0502   | 0,1004   | 0,0215         | 87490  |        |              |             |
| 24,87                                | -0,0477   | 0,0478   | 0,0955   | 0,0196         | 83851  |        |              |             |
| 24,8725                              | -0,0492   | 0,0494   | 0,0986   | 0,0206         | 84418  |        |              |             |

**4.1.4.2. Ganancia normal**

*Tabla 39. Medidas de las esferas de 10mm HP-L-10.6® en Ganancia Normal (Post-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |        |          |          |                |        |        |              |             |
|--|--------|----------|----------|----------------|--------|--------|--------------|-------------|
| DIÁMETRO 10mm                          | ESFERA |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|  |        |          |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                          | SPH 1  | MEDIDA 1 | 9,9321   | -0,044         | 0,0444 | 0,0884 | 0,0195       | 13.530      |
|  | SPH 2  |          | 9,9144   | -0,0585        | 0,0588 | 0,1173 | 0,0248       | 21.044      |
|  | SPH 3  |          | 9,9072   | -0,042         | 0,042  | 0,084  | 0,0184       | 13.666      |
|  | SPH 4  |          | 9,9359   | -0,0432        | 0,0436 | 0,0868 | 0,0183       | 13.701      |
|  | SPH 5  |          | 9,9196   | -0,0419        | 0,042  | 0,0839 | 0,0183       | 13.612      |
|  | SPH 6  |          | 9,8823   | -0,0419        | 0,0432 | 0,0851 | 0,018        | 13.380      |
|  | SPH 7  |          | 9,8689   | -0,0451        | 0,0452 | 0,0903 | 0,019        | 13.346      |
|  | SPH 8  |          | 9,9286   | -0,055         | 0,0676 | 0,1226 | 0,0225       | 14.238      |
|  | SPH 9  |          | 9,8931   | -0,0524        | 0,053  | 0,1054 | 0,0238       | 20.456      |
|  | SPH 10 |          | 9,8873   | -0,0487        | 0,0488 | 0,0975 | 0,0205       | 13.496      |
| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |        |          |          |                |        |        |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                          | ESFERA |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|  |        |          |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                          | SPH 1  | MEDIDA 1 | 9,9288   | -0,0453        | 0,0458 | 0,0911 | 0,0204       | 13.506      |
|  | SPH 2  |          | 9,9116   | -0,0581        | 0,0582 | 0,1163 | 0,0254       | 20.837      |
|  | SPH 3  |          | 9,9022   | -0,043         | 0,043  | 0,086  | 0,0187       | 13.502      |
|  | SPH 4  |          | 9,9313   | -0,0415        | 0,043  | 0,0845 | 0,0182       | 13.542      |
|  | SPH 5  |          | 9,9154   | -0,0425        | 0,0431 | 0,0856 | 0,0184       | 13.436      |
|  | SPH 6  |          | 9,8856   | -0,0531        | 0,0532 | 0,1063 | 0,0207       | 13.872      |
|  | SPH 7  |          | 9,8624   | -0,0459        | 0,0466 | 0,0925 | 0,0193       | 13.288      |
|  | SPH 8  |          | 9,9208   | -0,0539        | 0,0556 | 0,1095 | 0,0217       | 13.883      |
|  | SPH 9  |          | 9,8917   | -0,0551        | 0,0552 | 0,1103 | 0,0248       | 20.344      |
|  | SPH 10 |          | 9,8819   | -0,0499        | 0,05   | 0,0999 | 0,0209       | 13.409      |
| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |        |          |          |                |        |        |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                          | ESFERA |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|  |        |          |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
| DIÁMETRO 10mm                          | SPH 1  | MEDIDA 1 | 9,8286   | -0,0695        | 0,0704 | 0,1399 | 0,0293       | 13.453      |
|  | SPH 2  |          | 9,8253   | -0,0731        | 0,1063 | 0,1794 | 0,0351       | 21.200      |
|  | SPH 3  |          | 9,8011   | -0,0668        | 0,0687 | 0,1355 | 0,0286       | 13.499      |
|  | SPH 4  |          | 9,8329   | -0,064         | 0,0694 | 0,1334 | 0,0279       | 13.574      |
|  | SPH 5  |          | 9,821    | -0,0634        | 0,0668 | 0,1302 | 0,0289       | 14.677      |
|  | SPH 6  |          | 9,7845   | -0,0592        | 0,0688 | 0,128  | 0,0278       | 13.475      |
|  | SPH 7  |          | 9,7651   | -0,0688        | 0,0691 | 0,1379 | 0,0277       | 13.192      |
|  | SPH 8  |          | 9,8313   | -0,0719        | 0,0967 | 0,1686 | 0,0335       | 14.203      |
|  | SPH 9  |          | 9,7917   | -0,0668        | 0,0728 | 0,1396 | 0,0303       | 20.139      |
|  | SPH 10 |          | 9,7814   | -0,0635        | 0,0711 | 0,1346 | 0,0284       | 13.387      |



*Tabla 40. Medidas de las esferas de 18mm HP-L-10.6® en Ganancia Normal (Post-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
|--|----------|----------------|---------|---------|--------------|-------------|--------|--------|
| ESFERA                                 | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|  |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 18mm                          | MEDIDA 1 | SPH 1          | 17,798  | -0,0685 | 0,0688       | 0,1373      | 0,0289 | 45.826 |
|  |          | SPH 2          | 17,7911 | -0,0673 | 0,0674       | 0,1347      | 0,0285 | 45.142 |
|  |          | SPH 3          | 17,7642 | -0,0639 | 0,0652       | 0,1291      | 0,0266 | 51.442 |
|  |          | SPH 4          | 17,8001 | -0,0676 | 0,0676       | 0,1352      | 0,0293 | 41.681 |
|  |          | SPH 5          | 17,789  | -0,0654 | 0,0656       | 0,147       | 0,028  | 46.653 |
|  |          | SPH 6          | 17,782  | -0,0813 | 0,0816       | 0,1469      | 0,0325 | 42.791 |
|  |          | SPH 7          | 17,7685 | -0,0687 | 0,0688       | 0,1375      | 0,0688 | 41.543 |
|  |          | SPH 8          | 17,7987 | -0,0689 | 0,069        | 0,1379      | 0,029  | 46.980 |
|  |          | SPH 9          | 17,7849 | -0,0696 | 0,0696       | 0,1392      | 0,0295 | 44.979 |
|  |          | SPH 10         | 17,7654 | -0,0681 | 0,0682       | 0,1363      | 0,0287 | 51.109 |
| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
| ESFERA                                 | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|  |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 18mm                          | MEDIDA 1 | SPH 1          | 17,8035 | -0,0702 | 0,0707       | 0,1409      | 0,0297 | 46.126 |
|  |          | SPH 2          | 17,7977 | -0,0686 | 0,069        | 0,1376      | 0,0294 | 45.347 |
|  |          | SPH 3          | 17,7702 | -0,0666 | 0,0672       | 0,1338      | 0,0275 | 51.680 |
|  |          | SPH 4          | 17,8064 | -0,0697 | 0,0698       | 0,1395      | 0,0301 | 41.957 |
|  |          | SPH 5          | 17,7919 | -0,0662 | 0,0711       | 0,1373      | 0,028  | 46.550 |
|  |          | SPH 6          | 17,7795 | -0,0709 | 0,0662       | 0,1371      | 0,0305 | 41.552 |
|  |          | SPH 7          | 17,7719 | -0,0695 | 0,0696       | 0,1391      | 0,0301 | 41.599 |
|  |          | SPH 8          | 17,8027 | -0,0712 | 0,0712       | 0,1424      | 0,0299 | 47.096 |
|  |          | SPH 9          | 17,7917 | -0,0715 | 0,0716       | 0,1431      | 0,0306 | 45.127 |
|  |          | SPH 10         | 17,7712 | -0,0701 | 0,0702       | 0,1403      | 0,0299 | 51.245 |
| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |          |                |         |         |              |             |        |        |
| ESFERA                                 | Diámetro | Error de Forma |         |         | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |        |        |
|  |          | MIN            | MAX     | MEDIDO  |              |             |        |        |
| DIÁMETRO 18mm                          | MEDIDA 1 | SPH 1          | 17,8173 | -0,0697 | 0,07         | 0,1397      | 0,0294 | 47.212 |
|  |          | SPH 2          | 17,8087 | -0,0692 | 0,0694       | 0,1386      | 0,0292 | 44.950 |
|  |          | SPH 3          | 17,7852 | -0,0661 | 0,0666       | 0,1327      | 0,0272 | 48.881 |
|  |          | SPH 4          | 17,8184 | -0,0686 | 0,0688       | 0,1374      | 0,0294 | 41.610 |
|  |          | SPH 5          | 17,8078 | -0,0674 | 0,0704       | 0,1378      | 0,0284 | 44.360 |
|  |          | SPH 6          | 17,7946 | -0,07   | 0,0674       | 0,1374      | 0,0303 | 41.357 |
|  |          | SPH 7          | 17,7843 | -0,0686 | 0,0686       | 0,1372      | 0,0296 | 41.388 |
|  |          | SPH 8          | 17,8173 | -0,0695 | 0,0696       | 0,1391      | 0,0293 | 50.564 |
|  |          | SPH 9          | 17,8029 | -0,0717 | 0,0718       | 0,1435      | 0,0302 | 44.902 |
|  |          | SPH 10         | 17,7854 | -0,0701 | 0,0704       | 0,1405      | 0,0293 | 47.542 |

*Tabla 41. Medidas de las esferas de 25mm HP-L-10.6® en Ganancia Normal (Post-ácido)*

| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |   |          |          |                |        |        |              |             |
|--|---|----------|----------|----------------|--------|--------|--------------|-------------|
| DIÁMETRO 25mm                          | ESFERA  |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|  | SPH 1<br>SPH 2<br>SPH 3<br>SPH 4<br>SPH 5<br>SPH 6<br>SPH 7<br>SPH 8<br>SPH 9<br>SPH 10 | MEDIDA 1 |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
|  |   |          |          |                |        |        |              |             |
|  |   |          | 24,8932  | -0,0398        | 0,0398 | 0,0796 | 0,0175       | 85.280      |
|  |   |          | 24,8928  | -0,0348        | 0,0348 | 0,0696 | 0,0149       | 85.125      |
|  |   |          | 24,8923  | -0,0356        | 0,0356 | 0,0712 | 0,0154       | 88.298      |
|  |   |          | 24,897   | -0,0382        | 0,0382 | 0,0764 | 0,0166       | 85.224      |
|  |   |          | 24,8815  | -0,037         | 0,0404 | 0,0774 | 0,016        | 89.385      |
|  |   |          | 24,8835  | -0,0404        | 0,037  | 0,0774 | 0,0181       | 85.860      |
|  |   |          | 24,8882  | -0,0368        | 0,0368 | 0,0736 | 0,0161       | 85.395      |
|  |   |          | 24,8997  | -0,0416        | 0,0416 | 0,0832 | 0,0185       | 85.001      |
|  |   |          | 25       | -0,0354        | 0,0354 | 0,0708 | 0,0158       | 85.334      |
|  |   |          | 24,8917  | -0,0394        | 0,0394 | 0,0788 | 0,0178       | 88.976      |
| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |   |          |          |                |        |        |              |             |
| DIÁMETRO 25mm                          | ESFERA  |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|  | SPH 1<br>SPH 2<br>SPH 3<br>SPH 4<br>SPH 5<br>SPH 6<br>SPH 7<br>SPH 8<br>SPH 9<br>SPH 10 | MEDIDA 1 |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
|  |   |          |          |                |        |        |              |             |
|  |   |          | 24,8911  | -0,0352        | 0,0352 | 0,0704 | 0,0151       | 84.838      |
|  |   |          | 24,893   | -0,0338        | 0,0338 | 0,0676 | 0,0142       | 84.806      |
|  |   |          | 24,8955  | -0,0376        | 0,0376 | 0,0752 | 0,0161       | 86.892      |
|  |   |          | 24,894   | -0,033         | 0,033  | 0,066  | 0,0138       | 85.075      |
|  |   |          | 24,8818  | -0,036         | 0,0352 | 0,0712 | 0,0148       | 87.458      |
|  |   |          | 24,8822  | -0,0352        | 0,036  | 0,0712 | 0,0145       | 86.172      |
|  |   |          | 24,8882  | -0,031         | 0,031  | 0,062  | 0,0131       | 85.101      |
|  |   |          | 24,8945  | -0,0332        | 0,0332 | 0,0664 | 0,0139       | 84.644      |
|  |   |          | 24,8768  | -0,0284        | 0,0284 | 0,0568 | 0,0119       | 84.490      |
|  |   |          | 24,8904  | -0,0338        | 0,0338 | 0,0676 | 0,0139       | 85.853      |
| HP-L-10.6 GANANCIA NORMAL (POST-ÁCIDO) |   |          |          |                |        |        |              |             |
| DIÁMETRO 25mm                          | ESFERA  |          | Diámetro | Error de Forma |        |        | DES_ESTANDAR | NUBE PUNTOS |
|  | SPH 1<br>SPH 2<br>SPH 3<br>SPH 4<br>SPH 5<br>SPH 6<br>SPH 7<br>SPH 8<br>SPH 9<br>SPH 10 | MEDIDA 1 |          | MIN            | MAX    | MEDIDO |              |             |
|  |   |          |          |                |        |        |              |             |
|  |   |          | 24,7912  | -0,0579        | 0,0581 | 0,116  | 0,0256       | 84.818      |
|  |   |          | 24,7755  | -0,0551        | 0,0552 | 0,1103 | 0,024        | 84.434      |
|  |   |          | 24,795   | -0,056         | 0,056  | 0,112  | 0,0241       | 87.496      |
|  |   |          | 24,7879  | -0,0562        | 0,0563 | 0,1125 | 0,0245       | 84.320      |
|  |   |          | 24,7783  | -0,056         | 0,0578 | 0,1138 | 0,0241       | 88.751      |
|  |   |          | 24,7821  | -0,0578        | 0,056  | 0,1138 | 0,0251       | 84.670      |
|  |   |          | 24,7952  | -0,0584        | 0,0584 | 0,1168 | 0,0255       | 84.556      |
|  |   |          | 24,7947  | -0,0572        | 0,0572 | 0,1144 | 0,0249       | 84.178      |
|  |   |          | 24,7939  | -0,0566        | 0,0566 | 0,1132 | 0,0245       | 84.397      |
|  |   |          | 24,7942  | -0,056         | 0,056  | 0,112  | 0,0241       | 87.796      |